

VŠB – Technická Univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechanické technologie

Opravné svařování heterogenního spoje

Repair Welding of Heterogeneous
Welded Joint

Student:

Vedoucí diplomové práce:

Osobní číslo:

Bc. Petr Žváček

Ing. Vladislav Ochodek

ZVA0028

Ostrava 2020

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Petr Žváček

Studijní program:

N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

2303T002 Strojírenská technologie

Téma:

Opravné svařování heterogeního svarového spoje
Repair Welding of Heterogeneous Welded Joint

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

1. Proved'te studii svařování heterogenních svarových spojů.
2. Proved'te studii svařování plátovaných ocelí.
3. Proved'te charakteristiku použitého základního materiálu.
4. Navrhněte a realizujte technologický postup opravy heterogeního svarového spoje.
5. Proved'te diskusi dosažených výsledků.

Seznam doporučené odborné literatury:

ASM. Handbook vol. 6, *Welding, Brazing, Soldering*. ASM 2001.
HRIVŇÁK, I. *Teoria zvaritelnosti kovov a zliatin*. Veda 1989.
KOU, S. *Welding Metallurgy*, John Wiley & Sons, 1987.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Vladislav Ochodek**

Datum zadání: 20.12.2019

Datum odevzdání: 18.05.2020

Ing. Lucie Krejčí, Ph.D.
vedoucí katedry

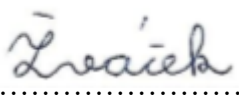


prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

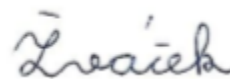
V Ostravě dne 22. května


.....
podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou*) práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona), • bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské*) práce bude uložen u vedoucího práce, • s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů - že tato bakalářská*) práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 22. května 2020.



.....
Podpis autora práce

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

ŽVÁČEK, P. Oprava heterogenního spoje: diplomová práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2020, 61 s. Vedoucí diplomové práce: Ochodek, V.

Diplomová práce se zabývá problematikou heterogenních svarových spojů a jejich následnou možností opravy. Na základě analytického a numerického modelu vedení tepla je určena dovolená vzdálenost vady od přechodu mezi svarovým kovem a svařovanou nízkolegovanou ocelí, tak aby při případném opravném svařování nedošlo k tepelnému ovlivnění konstrukční oceli a nemusela se tepelně zpracovávat. Jednotlivé výpočty jsou porovnány s průběhy teplot v různých bodech svařovaného materiálu, získané měřeními teplotních cyklů při experimentálním svařování.

Klíčová slova: oprava heterogenního spoje, Simufact Welding, numerická simulace, heterogenní svarový spoj

ANNOTATION OF MASTER THESIS

ŽVÁČEK, P. Repair Welding Of Heterogeneous Welded Joint: Master Thesis. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering, 2020, 61 p. Thesis head: Ochodek, V.

This diploma thesis deals with problematic heterogeneous welded joints and their subsequent repair. Based on the analytical and numerical model of heat conduction is determined allowed distance of repair point between weld metal and low alloy steel so that when there is a need for repair by welding, the construction steel doesn't get thermally affected and must not use heat treatment. The results are then compared with graphs that track the heat in given welded areas which are obtained by measuring heat cycles when experimental welding.

Key words: repair welding of heterogeneous joint, Simufact Welding, numerical simulation, heterogeneous weld joint

Obsah

strana

Seznam použitých zkratk a symbolů	8
Úvod.....	10
1 Problematika heterogenní spojů.....	11
1.1 Homogenní svarový spoj	11
1.2 Heterogenní svarový spoj	11
1.3 Volba technologie svařování.....	12
1.4 Spojování ocelí rozdílných strukturních bází.....	12
1.5 Použití Schaefflerova diagramu	12
1.6 Heterogenní svarové spoje z pohledu složení a struktury	13
1.7 Problematika svařování heterogenních svarových spojů	15
1.8 Plátované oceli	18
2 Teplotní pole při svařování	22
2.1 Teplotní cykly při svařování	22
3 Analytické modelování šíření tepla při obloukovém svařování.....	23
3.1 Modely těles a tepelných zdrojů při tavném svařování	23
3.2 Analytické modely vedení tepla pro svařování.....	25
3.3 Výpočty kritických teplot ocelí Ac1, Ac3, T _{tav}	28
4 Experimentální část	30
4.1 Průběh experimentu	30
4.2 Výsledky měření při experimentálním svařování	33
4.3 Měření skutečných vzdáleností termočlánků od rozhraní návaru a tloušťek návarů	35
4.4 Analytický výpočet	37
4.5 Numerická simulace.....	39
4.6 Vstupní parametry pro simulaci	42
4.7 Provedení výpočtu simulace	44
4.8 Výsledky numerické simulace	45
4.9 Porovnání experimentu s výsledky numerické simulace a analytického výpočtu ...	46
5 Návrh opravy heterogenního spoje	50

Diskuze dosažených výsledků.....	53
Závěr.....	55
Seznam použité literatury	57
Seznam obrázků	59
Seznam tabulek.....	60
Seznam příloh	61

Seznam použitých zkratk a symbolů

Q_{ef}	optimální vnesené teplo	[J.mm ⁻¹]
$W_{2D,TOO}$	šířka teplem ovlivněné oblasti vypočítané dle modelu dvourozměrného odvodu tepla	[mm]
$W_{3D,TOO}$	šířka teplem ovlivněné oblasti vypočítané dle třírozměrného odvodu tepla	[mm]
W_{TOO} skutečná	skutečná šířka teplem ovlivněné oblasti	
δ_{gr}	přechodová tloušťka svařovaného materiálu	[mm]
c	měrné tepelná kapacita	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
F	korekční faktor	[-]
HSS	heterogenní svarový spoj	
q	efektivní tepelný příkon zdroje tepla při svařování	[J.s ⁻¹]
Q	vnesené teplo do oblasti svaru	[J]
R, r	rádus vektor tepelného zdroje	[mm]
T	počítaná teplota	[°K]
T ₀	teplota přehřevu	[°K]
T _A	termočlánek A	[-]
T _B	termočlánek B	[-]
T _{max}	maximální teplota teplotního cyklu	[°C]
TOO	teplem ovlivněná zóna	[-]
T _s	teplota tavení	[°C]
T _{tav}	teplota tavení	[°C]
v	rychlost svařování	[m.s ⁻¹]
W	šířka teplem ovlivněné oblasti	[mm]
$\Delta t_{2D,8/5}$	doba chladnutí z teploty 800 na 500 °C podle modelu dvourozměrného odvodu tepla	[s]
$\Delta t_{3D,8/5}$	doba chladnutí z teploty 800 na 500 °C dle modelu trojrozměrného odvodu tepla	[s]
$\Delta t_{8/5,skut}$	skutečná doba chladnutí z teploty 800 na 500 °C	[s]

λ	součinitel tepelné vodivosti	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
a	součinitel teplotní vodivosti	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$
δ	tloušťka svařovaného materiálu	$[\text{mm}]$
η	účinnost přenosu tepla ze svařovacího zdroje	$[-]$

Úvod

Proces svařování je složitá a komplexní strojírenská technologie ke spojování kovových i nekovových materiálů. Kvalita vyrobených spojů závisí na mnoha aspektech navržené technologie svařování. Jedním může být čistota přídavných materiálů a základních materiálů. Tyto materiály mohou obsahovat řadu nečistot, které ve výsledku mohou přímo ovlivnit kvalitu vyrobeného spoje. Velkým problémem mohou být například navlhle přídavné materiály, jedná se především o obaly obalovaných elektrod. Vodní vlhkost obsažená v přídavných materiálech, může při procesu svařování způsobovat póry a bublinky ve svarovém kovu, které se mohou následovně spojit a může tak dojít, ke vzniku nebezpečné lomové plochy. Nebo vlivem vysokých teplot v místě přenosu elektrického oblouku může voda disociovat na atomy vodíku a kyslíku, které se přivedou do svarového spoje, kde se mohou atomy vodíku, začít opět spojovat v molekuly a může tak dojít ke vzniku vnitřních pnutí v materiálu. Tyto pnutí mohou mít za následek vznik vodíkových trhlin, které ve výsledku oslabují celkovou pevnost svarového spoje.

Ve svarových spojkách a v jeho oblasti se může nacházet řada možných vad, tyto vady mohou být bodového, plošného nebo prostorového charakteru. A dále je možné tyto vady rozdělit na vnitřní a povrchové. Tyto vady můžou být způsobené špatně navrženou technologií, nekvalitou použitých materiálů, nebo také nezodpovědností svářeče, který takovou vadu vyrobil. Vzniku vad ve svarových spojkách je nutné se pokud možno vyvarovat použitím kvalitních materiálů, správně navrženými svářecími technologiemi, tepelným zpracováním anebo také kvalitním svářecím personálem. V případě kdy už jsou takové vady ve svarovém spoji vyrobeny, je nutné tyto vady detekovat a lokalizovat. A případně zjistit zda se tato vada dá opravit za rozumné finanční a časové náklady.

V této diplomové práci je popsána problematika heterogenních spojů a stanovení kritérií pro svařování, aniž by došlo k tepelnému ovlivnění na straně nízkolegované oceli. A nedošlo tak ke vzniku zakalených struktur jako je martenzit, který je velmi náchylný na vznik vodíkových trhlin a je obecně tvrdý a málo houževnatý. Tyto struktury by bylo nutné tepelně zpracovávat, a pokud by se jednalo o opravy na velkých ocelových konstrukcích, muselo by se tepelně zpracovávat lokálně například pomocí odporových deček. A to by bylo velmi finančně i technologicky velmi náročné. Pro určení opravitelnosti takové vady ve svarovém spoji za předpokladu, že nebude nutné daný spoj tepelně zpracovávat, je určující především vzdálenost vady od materiálů, který nemá být degradován a svařovací parametry použité technologie svařování. V diplomové práci jsou popsány dva přístupy řešení, jeden je analytický a druhý numerický metodou konečných prvků.

1 Problematika heterogenní spojů

V současné době, kdy různé části procesních zařízení pracují za různých teplotních podmínek, si vyžaduje i použití různorodých materiálů, které je nutné navzájem svařovat. Takové svarové spoje se nazývají heterogenní svarové spoje HSS. Při svařování různorodých materiálů je třeba zvážit mnoho faktorů, jako jsou rozdílné fyzikální a mechanické vlastnosti svařovaných kovů, mezi které patří teploty tavení, polymorfismus, koeficienty teplotní roztažnosti a vodivosti, případně vzájemná smísitelnost, nebo rozpustnost svařovaných kovů. Většinu kombinací různorodých kovů, které se liší chemicky anebo metalurgicky, je možné je spojovat tlakovými technologiemi (difuzní, třecí, ultrazvukové, explozní svařování), nebo pájením a tavným svařováním. Při tavném svařování heterogenních spojů je důležité vhodně vybrat přídatný materiál, určit samotný postup svařování a případně i tepelné zpracování svarového spoje [1].

V případě navrhování HSS je třeba vzít v úvahu nalegování svarového kovu prvky, které jsou obsaženy v základních materiálech a jejich výsledný vliv na mechanické a fyzikální vlastnosti výsledné slitiny. Pro technologie tavného svařování je také důležité prozkoumat binární fázové diagramy obou použitých kovů. Pokud v diagramech existuje vzájemná rozpustnost těchto dvou kovů, může být spoj těchto kovů vyroben úspěšně. Zda-li mezi kovy, které mají být svařeny, není rozpustnost nebo je neúplná, provedení bude pravděpodobně neúspěšné. V některých případech je nutné použít třetí kov, který je rozpustný v obou kovech základních materiálů [2].

1.1 Homogenní svarový spoj

Homogenní svarové spoje lze označit spoj v místě ocelové konstrukce, kde jsou tavným způsobem spojeny konstrukční prvky ze stejného materiálu, nebo podobného chemického a fázového složení. Aby byly zaručeny mechanické vlastnosti svarového spoje, obvykle se přídatný materiál volí blízký chemického složení základnímu materiálu.

1.2 Heterogenní svarový spoj

Heterogenní svarové spoje vznikají, spojují-li se dva rozdílné materiály. Tyto spoje mohou být provedeny v různých formách. Jednou z těchto forem může být vytvoření ochranného, nebo jinak účelového návaru na uhlíkové oceli. Další možností je výroba plátovaných ocelí, kdy heterogenní spoj vzniká na rozhraní základního a plátovaného materiálu. Poslední možností jsou obvyklé konstrukční heterogenní spoje, kde se obvykle jedná o kombinace uhlíkové a austenitické oceli, které jsou časté na zařízeních pro energetiku nebo ropný průmysl. Tyto spoje se obvykle vytváří v místech, kde dochází ke změnám teplot, tlaku, korozních a jiných pracovních podmínek, za účelem úspory kvalitnějšího materiálu. V praxi se s těmito spoji můžeme setkat například na potrubí vedoucí z parogenerátorů v jaderných elektrárnách, při svařování nádob v petrochemickém

průmyslu, které povětšinou mívají plátovanou vnitřní vrstvu nádoby kvalitnější korozivzdornou a oteruvzdornou ocelí.

1.3 Volba technologie svařování

Pro svařování různorodých materiálů je potřebné, aby byl svarový kov co nejméně nelegován, což vyvolává potřebu použít technologie s nejnižšími hodnotami vneseného tepla na jednotku délky. Optimálními svařovacími procesy pro HSS jsou svařování laserem, elektronovým paprskem, svařování třením, mikroplazmou, ale tyto technologie lze aplikovat jen v málo případech. A tudíž potom je vhodné použít z dostupných technologií svařování ruční obloukové svařování (111) s nízkými hodnotami vneseného tepla tzn. nízké hodnoty svařovacího proudu, malé průměry elektrod a vyšší rychlosti svařování. Další možnou technologií je svařování tavící se elektrodou v neutrálním ochranném plynu (131) [3].

1.4 Spojování ocelí rozdílných strukturních bází

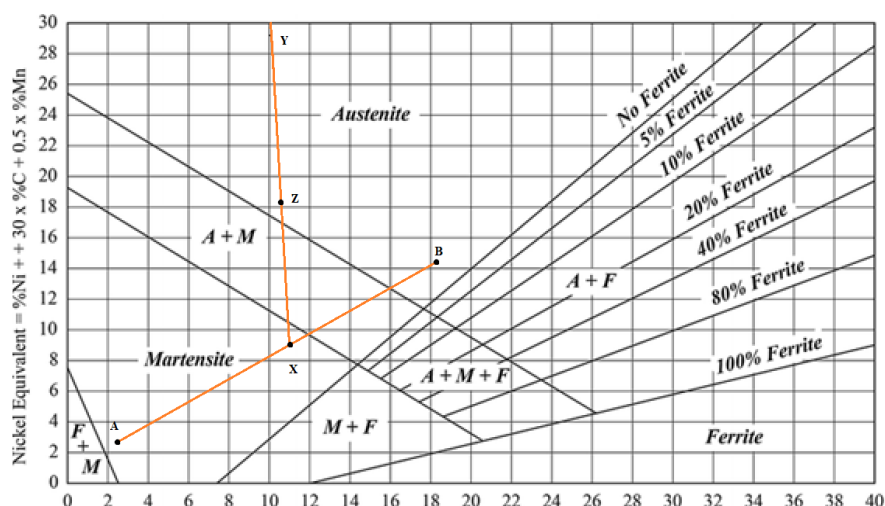
Při svařování ocelí rozdílného chemického složení a odlišných strukturních bází dochází vždy k degradaci jednoho nebo obou svařovaných materiálů, protože v přechodu mezi základním materiálem a svarovým kovem vzniká natavená zóna, která má odlišné chemické a mohou být degradovány mechanické, termodynamické a korozní vlastnosti. Jsou-li tyto spoje vystaveny teplotám vyšším než 350 °C, ať už během tepelného zpracování nebo za dlouhodobého provozu, odehrávají se mezi základním materiálem a svarovým kovem difuzní pochody, zejména difuze uhlíku. Difuze uhlíku má za následek tvorbu oduhličených a nauhličených pásů s degradovanými mechanickými vlastnostmi, což má za následek snížení spolehlivosti, životnosti a bezpečnosti svarového spoje [3].

1.5 Použití Schaefflerova diagramu

Způsob svařování heterogenních spojů závisí na provozní teplotě, době teplotní expozice a typu namáhání svarového spoje. Tyto uvedené parametry určují výsledné chování materiálu a stabilitu mezi přechodem svarového kovu a základního materiálu. Strukturní stavy, které vznikají v oceli v závislosti na jejím chemickém složení po rychlém ochlazení z rozpouštěcí teploty 1050 °C na teplotu 20 °C, je možné předpovědět z upraveného Schaefflerova diagramu. Ze Schaefflerova diagramu který se nachází na obrázku 1.1, je zjevné že v přechodu mezi feritickou a austenitickou ocelí, se bude vyskytovat jmenovitě martenzitická struktura, která především dle obsahu uhlíku může znesnadnit svařování. Při existenci martenzitické struktury je bezprostředně nutné svařovanou součást předehtřívát a předejít tak vzniku martenzitu s vysokým obsahem uhlíku [4,6,7].

Na obrázku 1.1 je znázorněno užití Schaefflerova diagramu pro svařování nízkolegované oceli s chrom-niklovou ocelí. Do Schaefflerova diagramu jsou nanášeny body charakterizované chromovým a niklovým ekvivalentem jednotlivých svařovaných

ocelí. Nízkolegovanou ocel charakterizuje (bod A) a nízkolegovanou ocel (bod B). Na spojnici těchto dvou bodů bude ležet bod odpovídající svarovému kovu, za předpokladu bude-li správně odhadnuto promísení. Vezmeme-li v úvahu nižší teplotu tavení austenitické oceli, tak potom můžeme určit hodnoty promísení 45 % nízkolegované a 55 % austenitické oceli. Tento bod bude vyznačen na úsečce AB. Nyní je nutno do diagramu zaznačit bod Y, který je charakteristický pro přídavný materiál elektrody VZU 60. Když odhadneme stupeň promísení svarového kovu se základními materiály 30%, potom je možné na úsečce YX vyznačit bod Z, který je charakteristický pro mikrostrukturu svarového kovu [1].



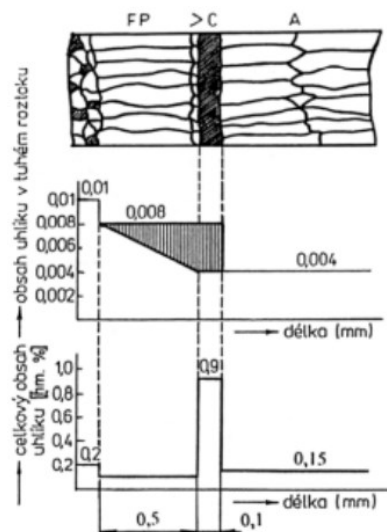
Obrázek 1.1 – Schaefflerův digram [5]

Chemické složení svarového kovu při svařování HSS závisí na složení obou základních materiálů, složení přídavného materiálu a stupně promísení svarového kovu se základními materiály. Důležitým faktem je, že chemické složení svarového kovu při svařování HSS není homogenní, zejména při mnohovrstvých svarech. Solidifikační charakteristiky svarového kovu jsou ovlivněny relativním promísením a gradienty chemického složení v blízkosti přechodových zón obou ocelí. Při svařování HSS platí všeobecní pravidlo, že pevnost a korozní odolnost svarového kovů, se musí minimálně rovnat vlastnostem horšího základního materiálu. Svařovaný materiál musí být také odolný vůči praskání, což v případě použití austenitického přídavného materiálu vyvolává potřebu 5–10 % feritu v mikrostruktuře svaru, v případě že se jedná o čistě austenitické svary, je nutné použít přídavné materiály s vyšším obsahem manganu, nebo použít přídavné materiály na bázi niklu. Za předpokladu že svařují dvě rozdílné korozivzdorné oceli tak se legování svarového kovu volí dle více legované oceli, ale s ohledem na zachování feritu kvůli odolnosti vůči trhlinám za horka a korozi [1].

1.6 Heterogenní svarové spoje z pohledu složení a struktury

Z důvodu rozlišných součinitelů teplotní roztažnosti austenitického kovu a feritických základních materiálů dochází při cyklickém tepelném namáhání k poruchám svarového

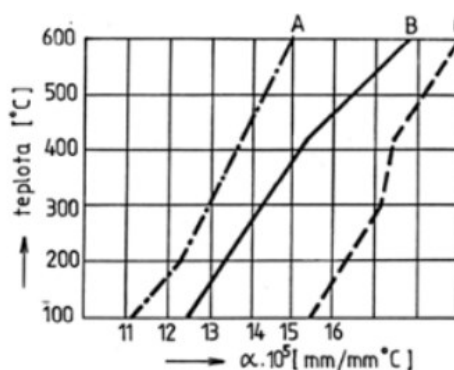
spoje. Nejčastěji dochází k poruchám mezi oduhličenou a nauhličenou oblastí, které vznikají z důvodu redistribuce uhlíku vlivem difuze za zvýšených teplot. Rozbor svarového spoje, který je dlouhodobě namáhán za teplot 550 °C, je uveden na obrázku 1.2.



Obrázek 1.2 – Rozbor svarového spoje ocelí rozdílných bází za teplot 550 °C [3]

Z tohoto důvodu je důležité při výběru přídavného materiálu a technologie svařování ocelí odlišných strukturních bází volit tak, aby za provozních podmínek byla tvorba nauhličených a oduhličených pásů potlačena na minimum, jinými slovy, aby byla strukturní stálost provedeného spoje co nejvyšší.

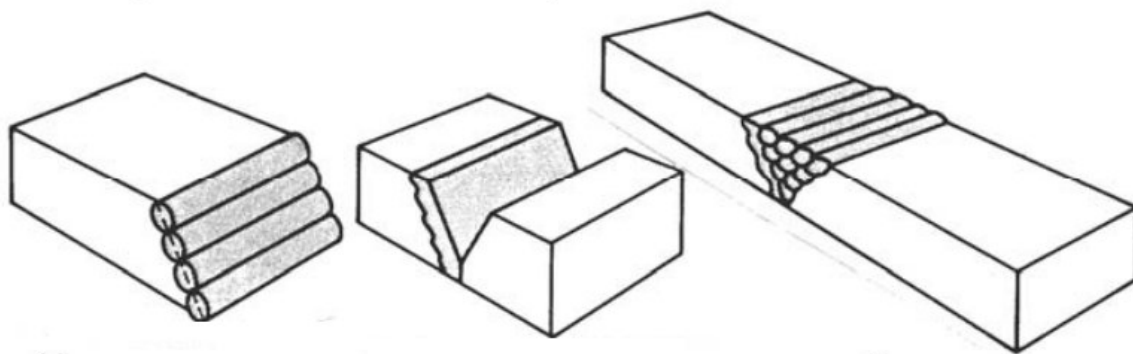
Z obrázku 1.3 je patrné že průběh teplotních roztažností jednotlivých materiálů má odlišný průběh, z čeho mohou při svařování, nebo při provozu při cyklickém ohřívání svařované součásti vznikat napětí v okolí svaru. Což může vést k deformacím v oblasti provedeného spoje, nebo k výskytu trhlin vlivem cyklického únavy materiálu. Pro spoje různorodých materiálů, by se měli používat svarové kovy, jejichž součinitele teplotní roztažnosti leží uprostřed mezi součiniteli roztažnosti obou svařovaných základních materiálů [3].



Obrázek 1.3 – Křivky průběhu teplotní roztažnosti v závislosti na teplotě ocelí rozdílných strukturních bází A – austenitický svarový kov 18 hm. % Cr, 8 hm. % Ni, B – svarový kov 60 hm. % Ni, 18 hm. % Cr, C – nízkoalokovaná žárupevná ocel [3]

1.7 Problematika svařování heterogenních svarových spojů

Při svařování ocelí rozdílných strukturních bází je třeba uvážit jejich rozdílné teploty tavení. Více legovaná ocel, konkrétně austenitická ocel má nižší teplotu než ocel méně legovaná. Navíc austenitické oceli mají širší oblast tuhnutí mezi teplotou likvidu a solidu. Velký rozdíl v teplotách tavení může způsobit praskání na straně oceli s nižší teplotou tavení, protože změna objemu při chladnutí svaru vyvolává napětí na straně austenitické oceli, čímž se zvyšuje riziko vzniku horkých trhlin na straně austenitické oceli. Tento problém je možné vyřešit nanesení jedné nebo více svarových housenek na stranu konstrukční oceli s vyšší teplotou tavení. Tento postup se nazývá polštářování. Polštářování je možné použít jako bariéru pro nežádoucí redistribuci některých prvků, zejména uhlíku do svarového kovu, ke které může dojít při tepelné zpracování svarového spoje, nebo při dlouhodobém provozu za zvýšených teplot [1].



Obrázek 1.4 – Postup svařování feritické oceli s austenitickou korozivzdornou ocelí s použitím polštářování [1]

Také rozdíly v koeficientech tepelné vodivosti při svařování heterogenních materiálů mohou způsobovat problémy při výrobě svarového spoje. Austenitická ocel má znatelně nižší tepelnou vodivost než konstrukční ocel. Z toho důvodu je třeba při svařování směřovat elektrický oblouk více ke konstrukční oceli, aby se austenitická ocel příliš nenatavovala. Pokud je nutné materiály budoucího svaru předehřívát, je třeba zdroj tepla orientovat více na materiál s větší tepelnou vodivostí. Rozdíly v koeficientech teplotní roztažnosti mohou vyvolat ve svarovém kovu vznik napětí na straně oceli s větším koeficientem teplotní roztažnosti. Zejména svarové spoje, které pracují v proměnlivých teplotních režimech a jsou v důsledku rozdílných teplotních koeficientů teplotní roztažnosti cyklicky namáhány v oblasti tepelné vysoko deformační únavy [1].

Svařování spojů pracujících při provozní teplotě do 350 °C

Zdali svarový spoj ocelí pracuje při provozní teplotě do teploty 350 °C je doporučeno svařovat austenitickými elektrodami, které poskytují plastický svarový kov s vysokou houževnatostí. Mezi osvědčené přídatné materiály patří nízkouhlíkové austenitické elektrody s obsahem 18 hm. % Cr, 8 hm. % Ni a 7 hm. % Mn, nebo elektrody s 18 hm. % Cr, 10 hm. % Ni, stabilizované niobem dle obsahu uhlíku. Doporučuje se

svařovat postupem, při kterém se nejprve provede polštářování na feritické oceli austenitickými elektrodami ve dvou vrstvách, přičemž druhá vrstva slouží jako žíhací vrstva. Polštářování první vrstvy feritické oceli by mělo proběhnout s předehřevem na 150 °C, další vrstvy je možné provést bez předehřevu. Z konstrukčního hlediska by mělo být polštářování dostatečně široké, aby mělo požadované mechanické vlastnosti. I když se dle Schaefflerova diagramu v přechodu mezi austenitickým svarovým kovem a feritickým základním materiálem vyskytuje martenzitická struktura, lze tímto způsobem vytvořit houževnatý svarový spoj, který je do teplot 350 °C strukturně stálý. Lze to vysvětlit tím, že v tomto přechodu při rychlém ochlazení vzniká zakalená fáze s velmi nízkým obsahem uhlíku (0,05 až 0,08 % C), což je nízkouhlíkový martenzit, který je poměrně houževnatý [3, 8].

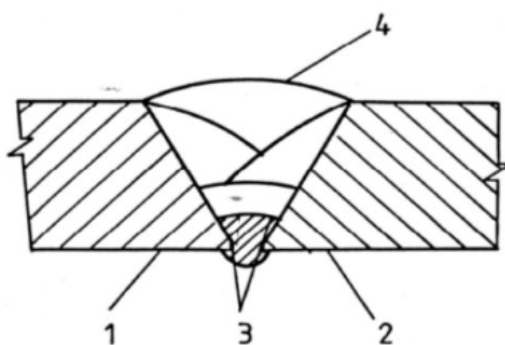
Při svařování středně legovaných ocelí o vyšší pevnosti se provádí polštářování s předehřevem 150 °C elektrodami, které obsahují ve svarovém kovu 20 % hm. Cr a 13 % hm. Ni přičemž se na tento polštář navařuje žíhací vrstva o složení 18 % hm. Cr, 10 % hm. Ni, která slouží k vyžihání tepelně ovlivněné oblasti. První vrstva polštáře je zředěná s feritickým základním materiálem a může být náchylná ke korozi, druhá vrstva již má dostatečný obsah Cr v rozpuštěného v tuhém roztoku, čímž je schopná vzdorovat korozi ve vodě. Druhá vrstva se svařuje bez předehřevu. Tento způsob se osvědčil při svařování ochranných vrstev tlakových nádob při provozních teplotách až 350 °C [8].

Pro svařování vysoko pevných, nízko a středně legovaných ocelí s austenitickými ocelmi se osvědčili elektrody s chemickým složením 0,03 % hm. C, 22 % hm Cr, 9 % hm. Ni, 3 hm. % Mo, 0,13 hm. N, které poskytují svarový kov o vysoké pevnosti s mezí kluzu okolo 645 MPa a při svařování s nízkým tepelným příkonem s předehřevem se ve svarových spojkách nevyskytují studené trhliny. Svarový kov legovaný dusíkem je vhodný zvláště za předpokladu, že svarový spoj má být po svařování tepelně zpracován. Z důvodu že dusík kladně ovlivňuje redistribuci uhlíku v přechodu mezi svarovým kovem a feritickou ocelí [8].

Dalším způsobem, kterým lze spojit austenitické oceli spolu s feritickými je použití polštářování feritické oceli nízkouhlíkovým svarovým kovem. S tím že vlastní svarový spoj je po polštářování svařen austenitickými elektrodami, které odpovídají základnímu austenitickému materiálu. Tento způsob se rozšířil pro svařování plátovaných a povlakovaných ocelí. Pro dosažení velmi kvalitního polštáře se doporučuje povrch první vrstvy polštáře přebrousit a odstranit tak nepříznivý důsledek nalegování velmi kvalitního svarového kovu základním materiálem. Je osvědčené odbroušení 1/3 výšky navařené housenky. Je-li nutné svarový spoj tepelně zpracovat, potom je doporučeno volit co nejnižší teploty žíhání s prodloužením doby žíhání [8].

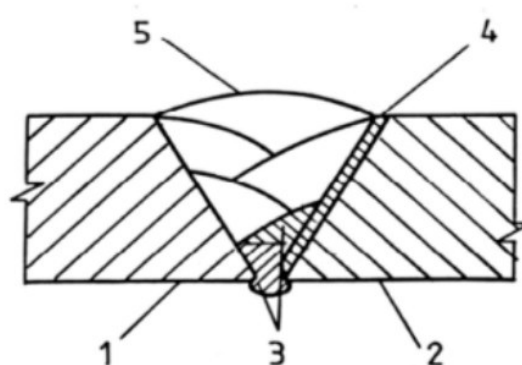
Svařování spojů pracujících při provozní teplotě nad 350 °C

Při návrhu svarových spojů austenitických ocelí spolu s feritickými za provozních teplot vyšších než 350 °C je nutné velmi pečlivě ošetřit strukturní stálost přechodu mezi svarovým kovem a základním materiálem. Strukturní stabilita je vyhovující za podmínek provozu, jestliže efektivní koeficient difuze uhlíku mezi feritickým základním materiálem austenitických svarovým kovem splňuje-li podmínku, že je menší než $10^{-10} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Jinak dochází k tvorbě oduhličených a nauhličených pásem, ve kterých dochází k difuzi uhlíku v důsledku vyrovnání chemického gradientu koncentrace uhlíku mezi tuhým roztokem feritické oceli a austenitického kovu. Šířka oduhličených a nauhličených pásem se dá poměrně jednoduše experimentálně stanovit, zdali se po svaření austenitické a feritické oceli vytvoří vzorky, které budou po dobu 1000 h nebo lépe 10^4 h vystaveny zkušební provozní teplotě. Poté je možno zhotovit metalografický výbrus a dle změřené šířky pásem vypočítat koeficient difuze uhlíku, který nesmí přesahovat hodnotu $10^{-10} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ [8].



Obrázek 1.5 – Konstrukce svarového spoje oceli rozdílných bází pracujícího za teplot vyšších než 350 °C

1 – austenitická ocel 18 hm. % Cr, 2 – nízko – legovaná ocel, 3 – kořen, svarový kov 38 hm. % Ni, 20 hm. % Cr, 4 – svarový kov 60 hm. % Ni, 18 hm. % Cr [3]



Obrázek 1.6 – Svařování ocelí rozdílných strukturních bází s použitím polštářování

1 - austenitická ocel 18 hm. % Cr, 8 hm. % Ni, 2 - nízko - legovaná ocel, 3 – kořen, svarový kov 38 hm. % Ni, 20 hm. % Cr, 4 – polštář, svarový kov 60 % hm. Ni, 18 hm. % Cr, 5 – svarový kov 18 hm. % Cr, 8 hm. % Ni [3]

Spoje s provozními teplotami nad 350 °C je možné svařovat postupy, které poskytují svarový kov s nízkou aktivitou uhlíku, který slouží jako difuzní bariéra. Nejvhodnější jsou přídavné materiály obsahující více než 30 % Ni. Tyto svary lze provést bez polštářování s použitím přídavných materiálů na bázi 38 hm. % Ni, 20 % hm. Cr pro svaření kořenové oblasti a 60 % hm. Ni, 18 % hm. Cr, pro výplň svaru viz obrázek 1.5. Druhou možností je využití polštářování feritické oceli, které by mělo být provedeno nejméně ve dvou vrstvách svarovým kovem s velmi nízkou koncentrací uhlíku a nízkou

rozpustností uhlíku v tuhém roztoku. Jak již bylo uvedeno, teplota předehřevu pro navařování polštáře se stanovuje dle feritické oceli. Pro svařování výplňového svaru jsou vhodné austenitické přídatné materiály na bázi 18 % hm. Cr, 8 % hm. Ni a velmi nízkým obsahem uhlíku (0,03 hm. % C), kvůli stabilizaci svarového kovu je vhodné legování niobem, kterým je možné potlačit tvorbu karbidů chromu po hranicích zrn. První vrstvy v kořenové části svaru je vhodné svařit přídatnými materiály s 60 % hm. Ni, 18 % hm. Cr, dá se tak předejít znehodnocení svarového kovu vlivem promísení se základními materiály v kořeni svaru a tím zamezit vzniku trhlin. Po provedení polštářování se spoj již nepřehřívá, až po dokončení svařování se spoj popouští za teplot na dolní předepsané hranici s prodloužením popouštěcí doby dle předpisu pro feriticko-martenzitický materiál. Způsob svařování metodou polštářování dle výše popsaného postupu se nachází na obrázku 1.6 [3, 8].

1.8 Plátované oceli

V současné době je mnoho tlustostěnných konstrukcí vyrobeno z plátovaných ocelových plechů, za účelem zvýšení korozní a abrazivní odolnosti. Opláštění těchto konstrukcí je vyrobeno z austenitických nerezových ocelí, kde nosným materiálem je uhlíková nebo nízkolegovaná ocel. Korozivzdorné oceli plátované na konstrukčních ocelích jsou k dispozici již více než 50 let a jsou široce rozšířeny v ropném, plynárenském, ale i v energetickém průmyslu. Použití ochranných vrstev z korozivzdorných ocelí má v ropných a plynových systémech řadu výhod. Při správném výběru materiálu, určeného na základně laboratorních testování, nebo čerpáním ze zkušeností z praxe na pracích v podobných prostředích, lze navrhnout výrobní systém, tak aby byly provozuschopné po celé trvání projektu. I když se investice do těchto materiálů se z prvního pohledu zdají poněkud vysoké, existují zde vysoké úspory s použitím těchto materiálů. Například lze ušetřit nemalé částky na inhibitech koroze, které jsou v petrochemickém průmyslu nutné pro provoz potrubí z uhlíkových ocelí, nebo na nákladech na kontrolu a údržbu těchto systémů. Tyto materiály je možné vyrábět válcováním za tepla, explozním svařováním, navařováním, anebo napájením. Tloušťka plátované vrstvy se pohybuje od 5 do 50 % celkové tloušťky plechu nebo stěny trubky, ale pro většinu aplikací se plátovaná vrstva pohybuje kolem 20 % celkové tloušťky plechu. Plátované oceli jsou celosvětově hojně používány pro konstrukce procesních nádob, separátory pro průmyslové kapaliny, stykače, výměníky tepla a jak bylo výše uvedeno pro průmyslová potrubí. Minimální tloušťka plátu se pohybuje kolem 1 mm [9, 1].

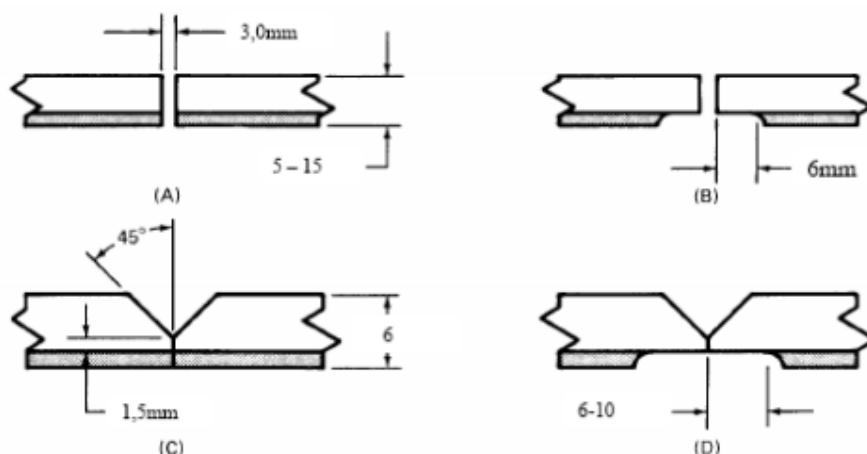
Plátované oceli jsou charakterizovány tloušťkou základního a plátovaného materiálu. Zde jsem uvedl orientační tabulku dostupných plátovaných materiálů s tloušťkami plátovaných vrstev.

Tabulka 1.1 – Orientační tabulka vyráběných plátovaných materiálů a tloušťky plátovaných vrstev [12]

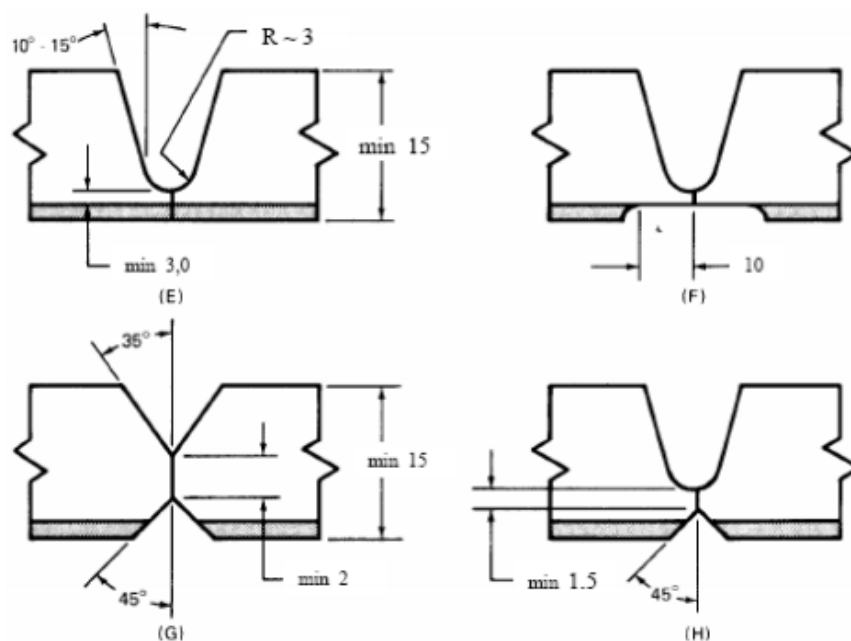
Plátovaná korozivzdorná ocel na feritické oceli		Plátované niklové plechy		Plátované titanové plechy	
Celková tloušťka plechu [mm]	Tloušťka plátované vrstvy [mm]	Celková tloušťka plechu [mm]	Tloušťka plátované vrstvy [mm]	Celková tloušťka plechu [mm]	Tloušťka plátované vrstvy [mm]
6,0 – 8,0	1,5 – 3,0	6,0 – 8,0	1,5 – 3,0	6,0 – 8,0	1,5 – 2,5
12,0 – 16,0	1,5 – 6,0	12,0 – 16,0	2,0 – 6,0	12,0 – 16,0	2,0 – 4,0
60,0 – 70,0	3,0 – 10,0	50,0 – 60,0	2,0 – 10,0	30,0 – 32,0	2,0 – 6,0
120,0 – 150,0	4,0 – 12,0	70,0 – 80,0	3,0 – 10,0	36,0 – 38,0	2,5 – 7,0

Svařování uhlíkových a nízkolegovaných ocelí s plátovanou vrstvou

Jestliže je potřeba dva plechy, nebo roury, které jsou plátované svařovat, je třeba si uvědomit, že svar je integrální součástí konstrukce, který musí být schopen nejen plně přenášet zatížení, ale také zachovat rovnoměrné mechanické vlastnosti plátovaného materiálu. Aby tohoto bylo dosaženo, je třeba použít patřičné úpravy svarových ploch. Schémata nejčastěji používaných úprav svarových ploch zahrnuje obrázek 1.7 a 1.8. V případě že svařujeme tenké plechy, je možné svařovat bez úkosů, viz obrázek 1.7 (A, B). Pro běžné svařování je možné použít U-úkos, oboustranný V-úkos, nebo jejich kombinaci. V případě úkosů (C, E) je možné po svaření výplňového svaru nosného materiálu kořenovou část odbrousit, abychom odstranili případnou pomíšenou zónu. Přídavný materiál musí být volen tak aby s ohledem na následovné promíšení s konstrukční ocelí, splňoval požadavky na korozní nebo abrazivní vlastnosti. Obvykle se nejprve svařuje základní materiál, přičemž uhlíkatý svarový kov by neměl penetrovat do základního materiálu. Promíšení konstrukční oceli s materiálem plátování za běžných okolností není problémem, protože při svařování plátované části je možné část kořenové oblasti již zhotoveného spoje obrousit [1].



Obrázek 1.7 Návrhy svarových úkosů při svařování plátovaných ocelí A – D [1]



Obrázek 1.8 – Návrhy úkosů při svařování plátovaných ocelí E – H [1]

Provedení svarů záleží na tloušťce plátovaných plechů a konečném použití svařované konstrukce. Tyto svary mohou být vyrobeny jednou ze dvou metod:

- Část nosného materiálu z uhlíkové nebo nízkolegované oceli je svařena vhodným přídavným materiálem pro tuto ocel. A oblast, kde byl plášť z nerezové oceli odstraněn při přípravě svarových ploch, je tato vrstva překryta krycím svarem z austenitické nerezové oceli [4].
- Celým výplňovým kovem svaru je zde nerezová ocel. Tato metoda se uplatňuje spíše pro svařování tenkých plechů, jelikož při svařování tlustostěnných plechů by s ohledem na cenu nerezových přídavných materiálu byly spoje neekonomické.

Další nevýhodou této metody mohou být problémy vzniklé příliš rozdílnými koeficienty tepelné roztažnosti nerezové a nízkolegované oceli, které mohou vést ke vzniku trhlin. Tyto svary by neměly mít vyšší provozní teplotu, než je 230 °C [4].

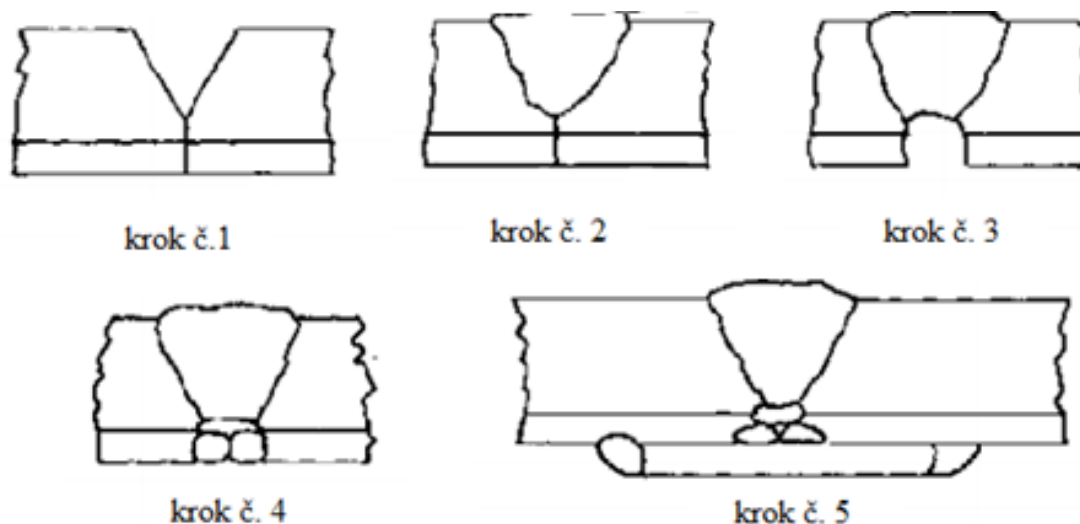
Metoda svařování plátovaných ocelí s rozdílnými přídavnými materiály

Výplňový svarový kov by měl mít dostatečný obsah legur, aby po promíšení s nosnou uhlíkovou ocelí, nedošlo k vytvoření křehké struktury náchylné na praskání. Obrázek 1.9 naznačuje nejčastěji užívanou metodu pro svařování uhlíkových nebo nízkolegovaných ocelí s plátovanou nerezovou vrstvou, kde je z ekonomických důvodů, nebo z důvodů rozdílných součinitelů teplotní roztažnosti nutné ukládat svarový kov z nerezové oceli pouze v přechodové oblasti plátování. Hrany svarových ploch musí být zkoseny, a toto zkosení musí končit minimálně 1,5 mm nad nerezovým pláštěm, jak je

uvedeno kroku č. 1. V kroku č. 2. se provádí svarový výplň s přídavným materiálem uhlíkové, nebo nízkolegované oceli, přičemž je nutno dbát, aby se kořen neprovařil k nerezovému opláštění a nedošlo k promísení.

Pro výplňovou část svaru je vhodné použít přídavné materiály s nízkým obsahem vodíku, aby se minimalizovalo nebezpečí vodíkového praskání. Následovně je nutné vytvořit drážku ze strany nerezové oceli pro vytvoření svarové plochy pro nerezovou vrstvu, aby se minimalizovalo promísení austenitické oceli, s ocelí feritickou viz krok č. 3. V kroku č. 4 se drážka vyrobená v předchozí operaci vyplní svarovým kovem z nerezové oceli. Tento krycí svar by měl být proveden minimálně ve dvou vrstvách, přičemž první vrstva z nerezové oceli by měla být mít dostatečnou tloušťku, aby se zamezilo kontaminaci základního materiálu do krycí nerezové vrstvy.

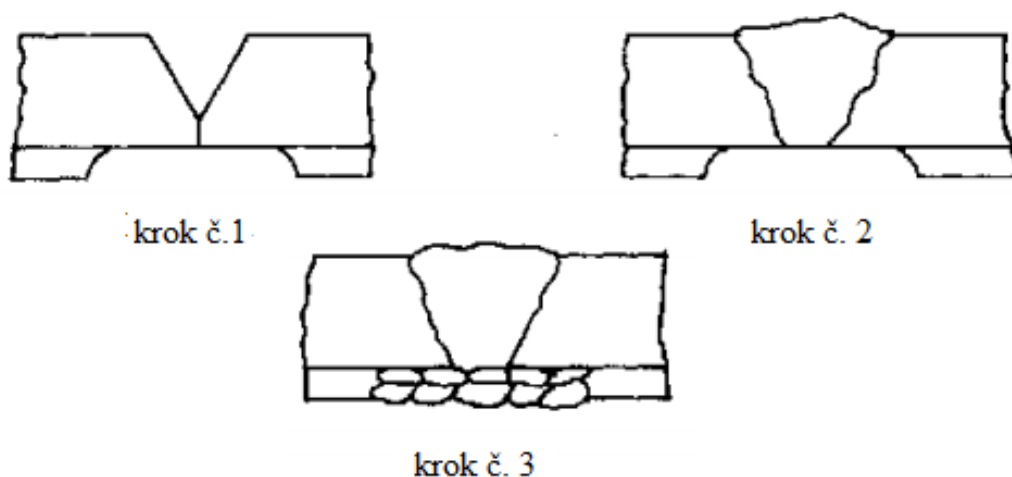
Doporučuje se, pokud je to tedy možné, aby svrchní krycí nerezová vrstva přesahovala povrch plátovaného plechu. V některých případech je možné přes výsledných krycí svar přivařit nerezový plech stejného materiálu, který je plátován, aby byla zaručena korozní odolnost. Tyto svary být rovněž pečlivě prohlédnuty [10].



Obrázek 1.9 – Postup svařování uhlíkových nebo nízkolegovaných oceli s plátovanými nerezovými vrstvami [10]

Možná alternativa předešlé metody

Alternativní způsob svařování uhlíkových a nízkolegovaných oceli s plátovanými nerezovými vrstvami, spočívá v odstranění nerezové vrstvy z oblasti svaru třiskovým obráběním, viz krok č. 1. Tento způsob je poněkud dražší, jelikož je zde operace pro odstranění nerezové vrstvy a je nutno tuto vrstvu následovně navařit. Avšak existuje zde možnost použití technologie svařování automatem pod tavidlem, pro vytvoření výplňového svaru na straně nosné oceli viz krok č. 2., jelikož zde nehrozí kontaminace nerezovou ocelí z opláštění [10].



Obrázek 1.10 – Alternativní postup svařování uhlíkových nebo nízkolegovaných oceli s plátovanými nerezovými plechy [10]

2 Teplotní pole při svařování

Aby byl základní a přídavný materiál při procesu svařování nataven, je nutné použití velmi koncentrovaného tepla. Důsledkem působení tepelných zdrojů vznikají teplotní pole kolem místa svařování. Výsledný tvar teplotního pole se odvíjí od fyzikálních vlastností svařovaného materiálu, intenzity zdroje tepla, technologie svařování, rychlosti svařování a charakteru odvodu tepla z místa svaru. Znalostí teplotních cyklů při procesu svařování se využívá při výzkumu a vývoji svařitelnosti materiálů, studiu praskavosti svarových spojů a jejich mikrostruktury. Znalost teplotních cyklů je také důležitým předpokladem pro modelování svařovacích procesů pomocí výpočetní techniky s využitím metod konečných prvků [11].

2.1 Teplotní cykly při svařování

Příčinou vzniku teplotního cyklu při procesu svařování je zdroj tepla, který působí v oblasti svarového spoje, pro termickou aktivaci svařovaných povrchů. Teplotní cyklus při obloukovém svařování se sestává z velmi rychlého ohřevu řádově několik stovek stupňů za sekundu na maximální teplotu a následovného relativně rychlého ochlazení, které se pohybuje řádově od několika desítek až stovek stupňů za sekundu. Ochlazovací větev teplotního cyklu zejména ovlivňuje strukturní přeměnu $\gamma \rightarrow \alpha$ a difuzi vodíku. Čím je větší rychlost ochlazování v oblasti transformačních teplot, tím je větší pravděpodobnost vzniku nerovnovážných struktur v teplem ovlivněné oblasti (TOO), které jsou při svařování nežádoucí, zejména martenzit. Naopak čím je rychlost ochlazování pod 300 °C pomalejší, tím větší pravděpodobnost že vodík difunduje ze svarové oblasti a zamezí se tak možnému vodíkovému praskání [11, 13].

Změny v mikrostruktury v TOO mohou negativně ovlivnit mechanické nebo korozní vlastnosti svařovaného materiálu. Proto je důležité být schopen předpovídat charakteristiky skutečného teplotního cyklu, jako je rozložení teplot v materiálu a rychlost ochlazení, má-li být predikována mikrostruktura a její vliv na vyrobený spoj. Nejpoužívanější známé

analytické řešení pro predikci teplotního cyklu a rychlosti ochlazení jsou dle přístupu Rosenthala, viz rovnice v následující kapitole (1.4) a (1.5). Jeho přístup byl založen na předpokladu bodového zdroje tepla na povrchu materiálu, zanedbávající jakýkoliv přenos tepla z povrchu. Rovněž se zde předpokládá, že tepelně-fyzikální vlastnosti, jako jsou tepelná vodivost a tepelná kapacita jsou konstanty, čili nejsou závislé na teplotě [13].

Měření teplotní cyklů je možné provádět pomocí termokamer, nebo termočlánků. Největší přesnosti však dosahují termočlánky. Pro měření teplotních cyklů se používají termočlánky z různých materiálů pro různé rozsahy teplot. Mezi nejčastěji používané termočlánky patří:

- | | |
|-------------------|------------------|
| • Fe – Konstantan | do cca 600 °C |
| • NiCr – Ni | do cca 1200 °C |
| • PtRh – Pt | do cca 1500 °C |
| • WRe – W | ve svarovém kovu |

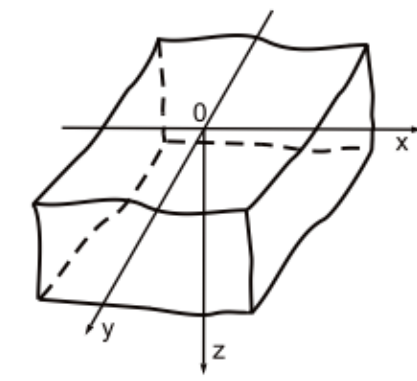
Typ termočlánku se volí dle vzdálenosti od hranice částečného natavení, v závislosti na tom, jaké teploty bude zaznamenávat. Pro přesné měření je třeba zajistit kovový kontakt mezi termočlánkem a měřeným místem. Toho se obvykle dosahuje přivařením kondenzátorovou impulsní svářečkou.

3 Analytické modelování šíření tepla při obloukovém svařování

Existuje několik různých přístupů, jak lze řešit rozložení tepelných polí při svařování. Řešení je možné provést experimentální, numerickou, nebo analytickou metodou. Analytické modely jsou odvozeny ze základní Fourierovy diferenciální rovnice vedení tepla a k řešení je možné přistupovat s možnými modifikacemi [14].

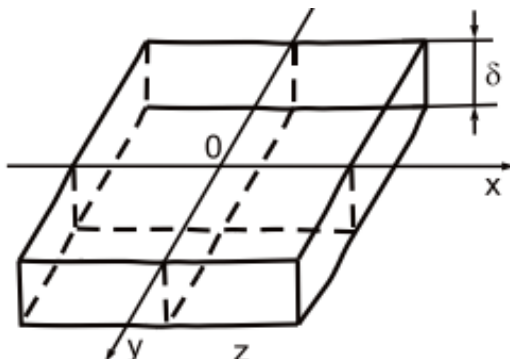
3.1 Modely těles a tepelných zdrojů při tavném svařování

- a) Polonekonečné těleso. Rozměry tělesa v osách x , y , z , jsou dostatečně velké, tak aby je pro výpočet bylo možné považovat za nekonečné. Čili odvod tepla je ve všech třech směrech ($\frac{\partial T}{\partial x} \neq 0, \frac{\partial T}{\partial y} \neq 0, \frac{\partial T}{\partial z} \neq 0$).



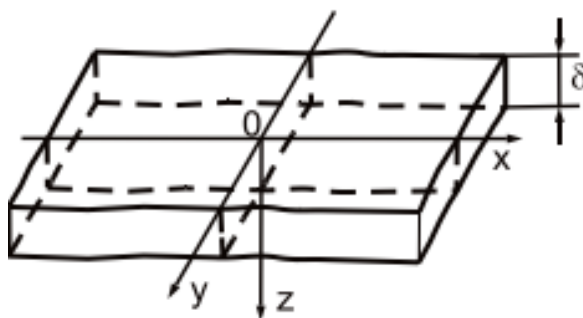
Obrázek 3.1 – Model polonekonečného tělesa pro vedení tepla při svařování [14]

- b) Tlustý plech. Rozměry tělesa v osách x a y jsou nekonečně dlouhé, zatímco ve směru osy z , se počítá s konečnou hodnotou rozměru plechu h . Teplota v závislosti na poloze v ose z , není stejná. Vedení tepla je trojrozměrné ($\frac{\partial T}{\partial x} \neq 0, \frac{\partial T}{\partial y} \neq 0, \frac{\partial T}{\partial z} \neq 0$).



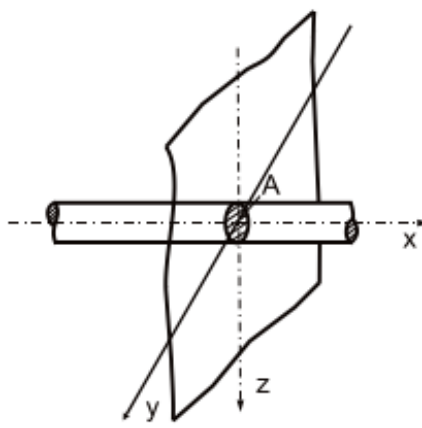
Obrázek 3.2 – Model tlustého plechu pro vedení tepla při svařování [14]

- c) Tenký plech. Je předpokládáno, že rozložení teplotního pole na obou stranách plechu je stejné. Vedení tepla je tedy dvourozměrné. Toto rozložení teplotního pole, lze pozorovat při svařování tenkých plechů bez úpravy svarových ploch.



Obrázek 3.3 – Model tenkého plechu pro vedení tepla při svařování [14]

- d) Prut je nekonečně dlouhé těleso v ose x , se stejnou teplotou v každém bodě průřezu, což má za následek lineární tok tepla v ose x .



Obrázek 3.4 – Model tenkého prutu pro vedení tepla při svařování [14]

3.2 Analytické modely vedení tepla pro svařování

Ze základní diferenciální rovnice vedení tepla (1) byly odvozeny analytické modely, které charakterizují krátkodobě působící a pohyblivé zdroje tepla na jednotlivé modely svařovaných těles [14].

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (1)$$

Tuto rovnici je možné přepsat do tvarů odpovídajícím různým tvarům zdrojů tepla.

- a) Plošný zdroj tepla aplikován na nekonečný prut

$$T(x, t) - T_0 = \frac{\frac{Q}{A}}{2 \cdot c \cdot \rho \sqrt{\pi \cdot a \cdot t}} e^{-\left(\frac{x^2}{4 \cdot a \cdot t}\right)}, \quad (2)$$

- b) Liniový zdroj tepla aplikován na tlustý plech

$$T(x, t) - T_0 = \frac{\frac{Q}{\delta}}{2 \cdot \rho \cdot (2 \cdot \sqrt{\pi \cdot a \cdot t})^2} e^{-\left(\frac{r^2}{4 \cdot a \cdot t}\right)}, \quad (3)$$

- c) Bodový zdroj tepla aplikován na polonekonečné těleso

$$T(x, t) - T_0 = \frac{Q}{c \cdot \rho \cdot (2 \cdot \sqrt{\pi \cdot a \cdot t})^3} e^{-\left(\frac{R^2}{4 \cdot a \cdot t}\right)}, \quad (3)$$

- d) Zjednodušený model teplotního pole pohyblivého liniového zdroje tepla s předpokladem, že rychlost svařování se blíží k nekonečnu, který je možný použít pro zjištění rozložení teplot při svařování tenkých plechů, tedy v případě že je možné použít dvourozměrný odvod tepla.

$$T - T_0 = \frac{q}{\sqrt{4 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot \rho \cdot c \cdot t \cdot v \cdot \delta}} e^{-\left(\frac{R^2}{4 \cdot a \cdot t}\right)}, \quad (4)$$

- e) Zjednodušený model teplotního pole pohyblivého bodového zdroje tepla s předpokladem, že svařovací rychlost se blíží k nekonečnu, který je možné použít pro zjištění distribuce teplot při svařování tlustých plechů, tedy s trojrozměrným odvodem tepla

$$T - T_0 = \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot v \cdot t} e^{-\left(\frac{R^2}{4 \cdot a \cdot t}\right)}, \quad (5)$$

- f) Analytický model šíření tepla pohyblivého liniového zdroje tepla s předpokladem, že rychlost tepelného zdroje se blíží k nekonečnu pro svařování tupých heterogenních spojů. Dalším předpokladem pro použití tohoto spoje je, že zdroj tepla se nachází na hranici rozhraní těchto dvou materiálů [15].

$$T_j(x, t) - T_0 = \frac{q}{v(\delta_1 \cdot \sqrt{c_1 \cdot \rho_1 \cdot \lambda_2} + \delta_2 \sqrt{c_2 \cdot \rho_2 \cdot \lambda_2})} \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot t}} \cdot e^{\left(-\frac{y^2}{4a_j t} - b \cdot t\right)}, \quad (6)$$

Tato rovnice (6) dá upravit na rovnice vyjadřující vztah mezi maximální teplotou a vzdáleností od působení zdroje tepla.

$$T_{\max j}(y) - T_0 = \sqrt{\frac{2}{\pi \cdot e}} \cdot \frac{q \sqrt{a_j}}{v \cdot (h_1 \cdot \sqrt{c_1 \cdot \rho_1 \cdot \lambda_2} + h_2 \cdot \sqrt{c_1 \cdot \rho_1 \cdot \lambda_2})} \cdot \frac{1}{|r|} \quad (7)$$

Z předešlých rovnic (4) a (5) lze odvodit rychlost ochlazování pro bod, který se nachází v rovině, kterou prochází zdroj tepla. Z následujících vztahů je možné vypočítat rychlost ochlazování při zvolené teplotě, nebo dobu chlazení, například dobu chlazení z teploty od 800 na 500°C tzv. čas $t_{8/5}$. Rovnice (8) vyjadřuje rychlost ochlazování pro dvourozměrný model odvodu tepla a rovnice (9) vyjadřuje rychlost ochlazování pro trojrozměrný model odvodu tepla [14].

$$w = 2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot \rho \cdot c \frac{(T - T_0)^3}{\left(\frac{q}{v}\right)^2}, \quad (8)$$

$$w = 2 \cdot \pi \cdot \lambda \frac{(T - T_0)^2}{\frac{q}{v}}, \quad (9)$$

Ochlazovací čas pro zjednodušený model dvourozměrného odvodu pro tenké plechy v intervalu teplot 800 do 500 °C, který je uvažován pro bod v ose svaru, je možné vypočítat dle následující rovnice (10).

$$t_{8/5} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot \rho \cdot c} \left(\frac{q}{v}\right)^2 \cdot \frac{1}{\delta^2} \left[\left(\frac{1}{500 - T_0}\right)^2 - \left(\frac{1}{800 - T_0}\right)^2 \right] \quad (10)$$

Ochlazovací čas pro zjednodušený model trojrozměrného odvodu tepla pro tlusté plechy v intervalu teplot 800 do 500°C, pro bod nacházející se v ose svaru platí následující rovnice (11).

$$t_{8/5} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \frac{q}{v} \left[\left(\frac{1}{500 - T_0}\right) - \left(\frac{1}{800 - T_0}\right) \right], \quad (11)$$

Řešením rovnice Q_{ef} po dosazení vypočítané doby ochlazování $t_{8/5}$, lze získat optimální tepelný příkon, který má být přiveden do materiálu při svařování, tak aby se dosáhlo vhodné doby ochlazování $t_{8/5}$ a tím požadované mechanické vlastnosti svarového spoje.

Pro dvourozměrný odvod tepla platí následující vztah:

$$Q_{ef} = \frac{q}{v} = \frac{4 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot c \cdot \rho \cdot \delta^2 \cdot t_{8/5}}{\sqrt{\left(\frac{1}{500 - T_0}\right)^2 - \left(\frac{1}{800 - T_0}\right)^2}} \quad (12)$$

Pro trojrozměrný odvod tepla platí vztah:

$$Q_{ef} = \frac{q}{v} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot t_{8/5}}{\frac{1}{500 - T_0} - \frac{1}{800 - T_0}} \quad (13)$$

Další úpravou rovnic (4) a (5) lze získat teplotu v závislosti od tepelného zdroje, čehož je možné využít při výpočtu šířky TOO. Pro dvojrozměrný model odvodu tepla platí rovnice (14) a pro trojrozměrný odvod tepla (15)

$$T - T_0 = \sqrt{\frac{2}{\pi \cdot e}} \cdot \frac{q}{2 \cdot \delta \cdot \rho \cdot R} \quad (14)$$

$$T - T_0 = \left(\frac{2}{\pi \cdot e}\right) \cdot \frac{q}{\rho \cdot c \cdot v \cdot R^2} \quad (15)$$

Pro výpočet šířky teplem ovlivněné zóny lze uplatnit vztahu (1.14) a (1.5), kde r_{Tav} je hranice ztavení a r_{Ac1} je linie pásma částečné překrystalisace.

$$W_{TOO} = r_{Ac1} - r_{Tav} \quad (1.16)$$

Nalezením r_{Ac1} a r_{Tav} z rovnic (1.14) a (1.16) a dosazením do rovnice (1.16) můžeme získat šířku TOO pro dvourozměrný a trojrozměrný model odvodu tepla.

$$W_{2D,TOO} = \sqrt{\frac{2}{\pi \cdot e}} \cdot \left(\frac{q \cdot (T_{tav} - A_{c1})}{2 \cdot \delta \cdot \rho \cdot c \cdot v \cdot (T_{tav} - T_0) \cdot (A_1 - T_0)} \right) \quad (17)$$

$$W_{3D,TOO} = \sqrt{\frac{2 \cdot q}{\pi \cdot e \cdot \rho \cdot c \cdot v}} \cdot \left[\frac{1}{\sqrt{A_{c1} - T_0}} - \frac{1}{\sqrt{T_{tav} - T_0}} \right] \quad (18)$$

Zdali bude použit trojrozměrný nebo dvojrozměrný model odvodu tepla závisí na přechodové tloušťce δ_{gr} . Pro výpočet hodnoty přechodové tloušťky platí následující vztah:

$$\delta_{gr} = \sqrt{\frac{\frac{q}{v}}{2 \cdot \rho \cdot c} \cdot \left(\frac{1}{500 - T_0}\right) - \left(\frac{1}{800 - T_0}\right)} \quad (19)$$

Když $\delta > \delta_{gr}$ je pro určení rozložení teplotního pole použit model dvourozměrného odvodu tepla, zatímco když $\delta < \delta_{gr}$ je použita rovnice pro trojrozměrný odvod tepla.

Jestliže se přechodová tloušťka δ_{gr} blíží tloušťce svařovaného materiálu δ , je možné že bude výpočet šířky TOO zatížen chybou. Tuto chybu je možné eliminovat zavedením korekčního faktoru F. Pro skutečnou šířku TOO potom platí vztah [13]:

$$W_{TOO\ skut.} = W_{3DTOO} + F \cdot (W_{2DTOO} - W_{3DTOO}) \quad (20)$$

Korekční faktor F se pohybuje mezi hodnotami 0 až 1 a slouží k odstranění odchylky od jednotlivých modelů odvodu tepla. Tento korekční faktor F lze získat na základě experimentu měření skutečné šířky TOO. Níže je uvedený vztah pro výpočet korekčního faktoru F.

$$F = \frac{(W_{TOO\ skut.} - W_{3DTOO})}{(W_{2DTOO} - W_{3DTOO})} \quad (21)$$

Další možností, kterou je možné zjistit korekční faktor F, je pomocí experimentu, při kterém se nyní sleduje doba chladnutí například z teploty 800 na 500°C. A obdobně jako při počítání z poměrů skutečné šířky teplem ovlivněné oblasti $W_{TOO\ skutečná}$ a vypočítaných hodnot pro jednotlivé modely odvodu tepla se provede výpočet s časy chladnutí [13].

$$F = \frac{\Delta t_{8/5,skut} - \Delta t_{3D,8/5}}{\Delta t_{2D,8/5} - \Delta t_{3D,8/5}} \quad (23)$$

Korekční faktory získané metodou měření šířky TOO, nebo měřením doby chladnutí by měli nabývat stejných hodnot.

3.3 Výpočty kritických teplot ocelí Ac1, Ac3, T_{tav}

Pro určení kritických teplot ocelí Ac1, Ac3, T_{tav} je možné kromě experimentálních metod, užít empirické vztahy, které na základě hmotnostních koncentrací legujících prvků jsou schopny s určitou přesností určit tyto teploty. Tyto rovnice jsou zpracovány na základě experimentů a pomocí regresní analýzy jsou vytvořeny parametrické vztahy. Každá takhle vytvořená empirická rovnice, má určitou oblast použitelnosti, která závisí na obsahu legujících prvků oceli. Těchto vztahů je možné uplatnit například pro určení rozmezí teplot pro tepelné zpracování neznámých ocelí.

Níže jsou uvedeny některé z existujících empirických vztahů pro výpočet teplot A_{c1} a A_{c3} od různých autorů:

a) dle Kunitake a Katou [16]

$$A_{c1} = 754,83 - 32,25 C - 17,76 Mn + 23,32 Si + 17,3 Cr + 4,51 Mo + 15,62 V \quad (24)$$

$$A_{c3} = 920,21 - 394,75 C - 14,40 Mn + 54,99 Si + 5,77 Cr + 24,49 Mo + 83,37 V \quad (25)$$

Rovnice jsou vhodné, pro ocele s následujícím chemickým složením: $0,25\% \leq C \leq 0,45\%$; $0,7 \leq Mn \leq 1,2\%$; $0,6 \leq Si \leq 3,1\%$; $0,8 \leq Cr \leq 2,9\%$; $0,2 \leq Mo \leq 0,9\%$; $V \leq 0,4\%$.

b) dle Trzaska [17]

$$A_{c1} = 742 - 29 C - 14 Mn + 13 Si + 16 Cr - 17 Ni - 16 Mo + 45 V + 36 Cu \quad (26)$$

$$A_{c3} = 925 - 219 C - 7 Mn + 39 Si - 16 Ni + 13 Mo + 97 V \quad (27)$$

Rovnice jsou vhodné, pro ocele s následujícím chemickým složením: $0,06\% \leq C \leq 0,68\%$; $0,13 \leq Mn \leq 2,04\%$; $0,12 \leq Si \leq 1,75\%$; $Ni \leq 3,85\%$; $Cr \leq 2,30\%$; $Mo \leq 1,05\%$; $V \leq 0,38\%$; $Cu \leq 0,38$.

c) dle Kasatkina [18]

$$\begin{aligned} A_{c1} = & 723 - 7,08 Mn + 37,7 Si + 18,1 Cr + 44,2 Mo + 8,95 Ni + 50,1 V \\ & + 21,7 Al + 3,18 W + 297 S - 830 N \\ & - 11,5 C \cdot Si - 14 Mn \cdot Si \\ & - 30 Si \cdot Cr - 57,9 C Mo - 15,5 Mn \cdot Mo - 5,28 C \cdot Ni \\ & + 6,77 Si \cdot Ni - 0,8 Cr \cdot Ni - 27,4 C \cdot V + 30,8 Mo V \\ & - 0,84 Cr^2 - 3,46 Mo^2 - 0,46 Ni^2 - 28 V^2 \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} A_{c3} = & 912 - 370 C - 27,4 Mn + 27,3 Si - 6,35 Cr - 32,7 Ni + 95,2 V \\ & + 190 Ti + 72 Al + 64,5 Nb + 5,57 W + 332 S + 276 P \\ & + 485 N - 900 B + 16,2 C \cdot Mn + 32,3 C \cdot Si + 15,4 C \cdot Cr \\ & + 48 C \cdot Ni + 4,32 Si \cdot Cr - 17,3 Si \cdot Mo - 18,6 Si \cdot Ni \\ & + 4,8 Mn \cdot Ni + 40,5 Mo \cdot V + 174 C^2 + 2,46 Mn^2 \\ & - 6,86 Si^2 + 0,322 Cr^2 + 9,9 Mo^2 + 1,24 Ni^2 - 60,2 V^2 \end{aligned} \quad (28)$$

Rovnice jsou vhodné, pro ocele splňující podmínky chemického složení: $C \leq 0,83\%$; $Mn \leq 2,0\%$; $Si \leq 1,0\%$; $Cr \leq 2,0\%$; $Mo \leq 1,0\%$; $Ni \leq 3,0\%$; $V \leq 0,5\%$; $W \leq 1,0\%$; $Ti \leq 0,15\%$; $Al \leq 0,2\%$; $Cu \leq 1,0\%$; $Nb \leq 0,20\%$; $P \leq 0,040\%$; $S \leq 0,040\%$; $N \leq 0,025\%$; $B \leq 0,010\%$.

Pro určení teploty tavení T_{Tav} ocelí je možné použít následující empirické vztahy [19, 220]:

$$a) T_{tav} = 1536 - 78 C + 7,6 Si + 4,9 Mn + 34 P + 30 S + 5 Cu + 3,1 Ni + 1,3 Cr + 2 Mo + 2 V + 18 Ti \quad (29)$$

$$b) T_{tav} = 1811 - 76,6 C - 7,1 Si - 5,7 Mn - 24,4 P - 33,4 S - 2,1 Cr - 2,8 V - 6,2 Al - 8,4 Cu - 4,3 Ni - 2,8 Co - 8,6 Nb - 4,2 Ta - 8,7 Ti - 9 As - W - 6,9 Sn - 54,7 N - 0,1 Mo - 55,3 O - 89 B \quad (30)$$

4 Experimentální část

Cílem experimentální části práce je určení dovolené vzdálenosti případné vady v heterogenním svarovém spoji od rozhraní konstrukční oceli, tak aby při opravném svařování nedošlo k ohřátí konstrukční oceli nad kritickou teplotu Ac_1 a nedošlo k tvorbě nežádoucích zakalených struktur náchylných ke vzniku trhlin, které by vedly k nutnosti tepelného zpracování svarového spoje. Pro určení této vzdálenosti jsou použity analytické modely vedení tepla pro tenké plechy „2D řešení“, tlusté plechy „3D řešení“, analytický model pro heterogenní tupý svarový spoj a numerické řešení v simulačním softwaru Simufact Welding. Řešení pro tenké plechy je konkrétně upravená rovnice pro zjednodušený model teplotního pole pohyblivého liniového zdroje tepla s předpokladem, že rychlost svařování se blíží k nekonečnu, který odpovídá řešení pro tenké plechy „rovnice číslo (14) v teoretické části“. Řešení pro tlusté plechy je upravená rovnice pro zjednodušený model teplotního pole pohyblivého bodového zdroje tepla s předpokladem, že svařovací rychlost se blíží k nekonečnu, který je určen pro tlusté plechy „rovnice číslo (15) v teoretické části“. Řešení pro heterogenní spoj je upravená rovnice pro šíření tepla v tupém heterogenním spoji „rovnice číslo (7) v teoretické části“. Tyto jednotlivá řešení budou porovnány s výsledky naměřených teplotních cyklů z navrženého experimentu. Kromě těchto porovnání, je v práci uveden reálný příklad a jeho řešení.

4.1 Průběh experimentu

Experiment sestával z provedení měření teplotních cyklů v austenitických vrstvách heterogenních spojů při simulaci opravného svařování. Tyto heterogenní spoje byl ve formě austenitických návarů, které byly nanášeny na desku z konstrukční oceli. Návary byly provedeny celkem tři o různých tloušťkách. Po provedení návaru byla na těchto návarech vybroušena rovina pomocí úhlové brusky. Hodnoty tloušťek jednotlivých návarů byly změřeny posuvným měřítkem a dosahovaly hodnot 2,11 mm, 3,26 mm a 7,3 mm. Návary byly zhotoveny z vysokolegované austenitické oceli 316L (dle normy EN X2CrNiMoN22-5-3) a základním materiálem, na který se nanášely návary, byl S355 (11 523 dle ČSN).

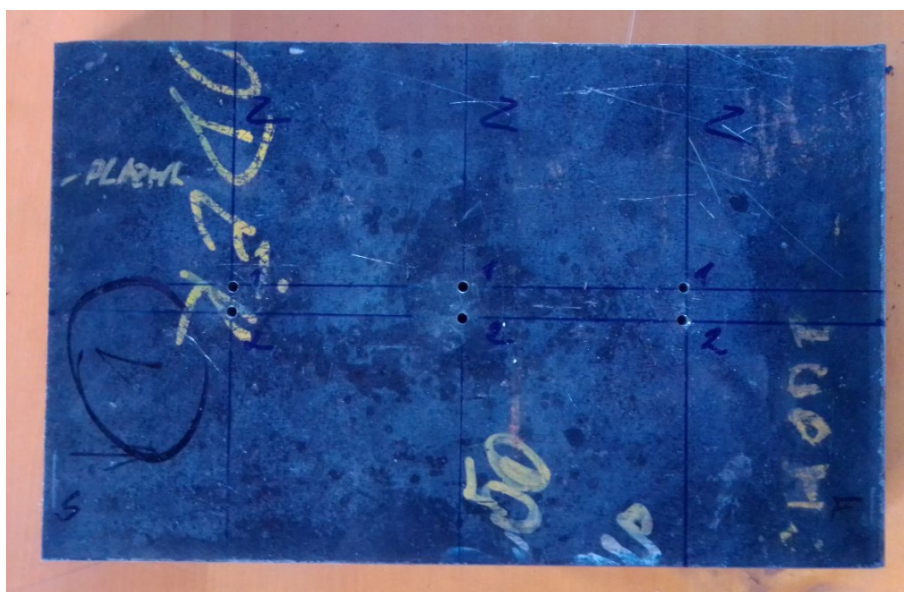
Uspořádání návarů na desce je možné vidět na obrázku 4.1. Pod těmito návary byly vyvrtány otvory různých hloubek, které sloužili pro zavedení termočlánků. Rozteč každé dvojice otvorů pod každým návarem byla 10 mm. Hloubka vyvrtaných otvorů byla

změřena posuvným měřítkem a rozdílem celkové tloušťky desky s návarem a hloubek otvorů byly vypočítány přibližné hodnoty vrstev návarů od jednotlivých termočlánků. Tyto naměřené hodnoty v dílenských podmínkách následovně porovnám s hodnotami z metalografického šetření. Rozmístění jednotlivých otvorů pro zavedení termočlánků je zjevné z obrázku 4.2.

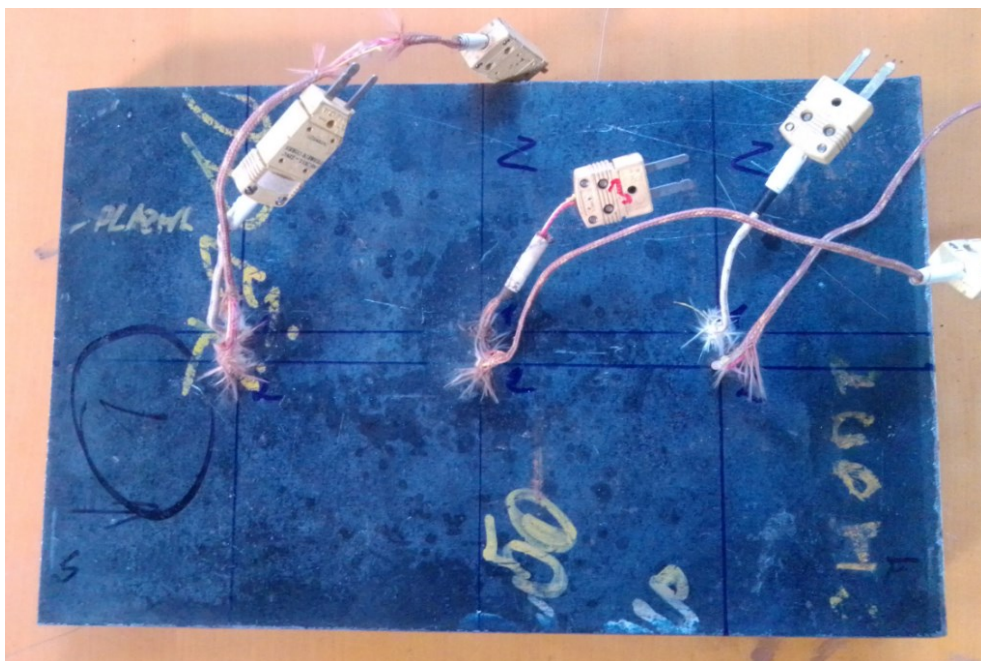


Obrázek 4.1 – Vzorek pro simulaci opravy heterogenního spoje

Do každého z těchto otvorů byly přivedeny termočlánky typu Ni – CrNi a přivařeny pomocí kondenzátorového výboje. Jednotlivé termočlánky přivařené na zkušební vzorku je možné vidět na obrázku 4.3. Po přivaření termočlánků následovalo jejich zapojení na převodník, který převádí vzniklé termoelektrické napětí na teplotu. Záznam teploty byl nastaven na frekvenci 10 Hz, což znamená, že teplota byla měřena každou desetinu vteřiny.



Obrázek 4.2 – Rozmístění otvorů pro zavedení termočlánků



Obrázek 4.3 Rozmístění termočláňků na zkušební desce

Další krokem v průběhu experimentu bylo provedení simulace opravy heterogenního spoje. Tato simulace spočívala v navaření jedné svarové housenky na již stávající podkladový návar, která simulovala opravu na straně austenitického materiálu. Provedení simulace opravy je možné vidět na obrázku 4.4. Při pokládání těchto housenek na podkladový austenitický návar, bylo provedeno měření teplotních cyklů ve dvou bodech každého austenitického návaru, které se nacházely v různých hloubkách návarů. Nejdůležitějšími hodnotami teplotních cyklů byly jejich maximální hodnoty teplot, které budu v další podkapitole porovnávat s analytickými modely vedení tepla, které jsem vyjmenoval v úvodu experimentu a budou prodiskutovány jejich případné odchylky od těchto experimentálních měření

Při navařování opravné austenitické vrstvy, bylo na svařovacím zdroji nastaveno svařovací napětí 21 V a svařovací proud 90 A. Dále jsem při tomto navařování měřil pomocí stopky svařovací čas, který následovně sloužil k výpočtu rychlosti svařování, která byla počítána z podílu délky opravné housenky a svařovacího času. Svařovací rychlost velkým způsobem ovlivňuje vnesené teplo do svarového spoje. Čím je rychlost pomalejší, tím více tepelné energie je vneseno do svarového spoje a tím je potom větší teplem ovlivněná vrstva svařovaného materiálu. Svařovací parametry jednotlivých opravných vrstev se nachází v tabulce 4.1 a bude se s nimi nadále pracovat v nadcházející kapitole s analytickými výpočty.



Obrázek 4.4 – Vzorek po provedení simulace opravného svařování

Tabulka 4.1 – Svařovací parametry použité pro jednotlivé návary [12]

Svařovací parametry	Návar č. 1	Návar č. 2	Návar č. 3
Svařovací napětí [V]	21	21	21
Svařovací proud [A]	90	90	90
Rychlost svařování [cm.min ⁻¹]	17,42	24,11	22,28

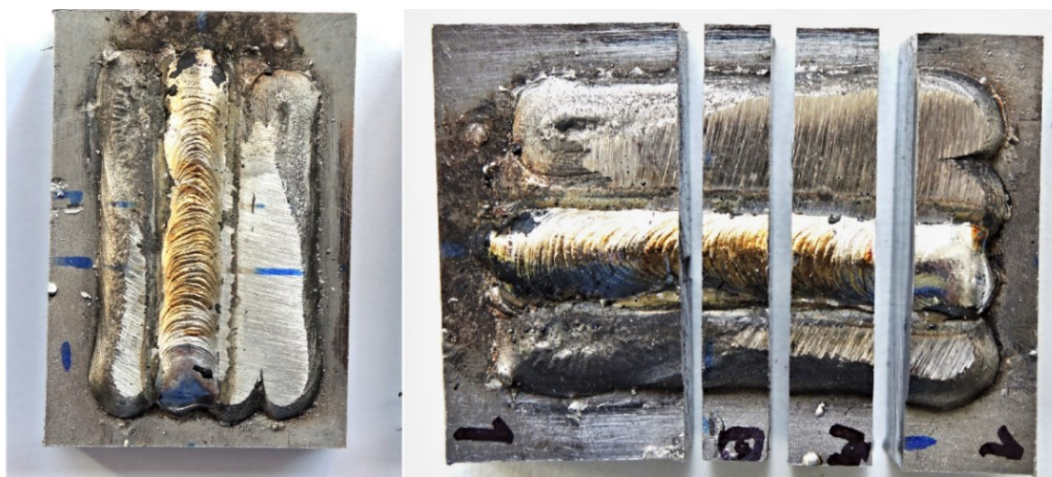
4.2 Výsledky měření při experimentálním svařování

Data o průbězích teplotních cyklů byla zpracována do formy grafů, které se nachází na obrázcích 4.5 a 4.6. Pro tento experiment jsou důležité zejména maximální hodnoty křivek průběhu teploty v návarech, tyto teploty se nacházejí v tabulce 4.2, ze které je možné odečíst maximální teploty T_{\max} naměřené na jednotlivých termočláncích a přibližné vzdálenosti termočlánců od podkladového austenitického návaru. Tyto vzdálenosti jsou rozdílem tloušťky podkladového materiálu s austenitickým návarem a hloubky vyvrtaného otvoru. Protože při zavádění termočláncu do vyvrtaných otvorů nelze přesně určit, v jakém místě byl termočlánek přivařen. Proto jsou tyto hodnoty pouze orientační, přesné hodnoty jsou uvedeny v tabulce 4.2 v další podkapitole.

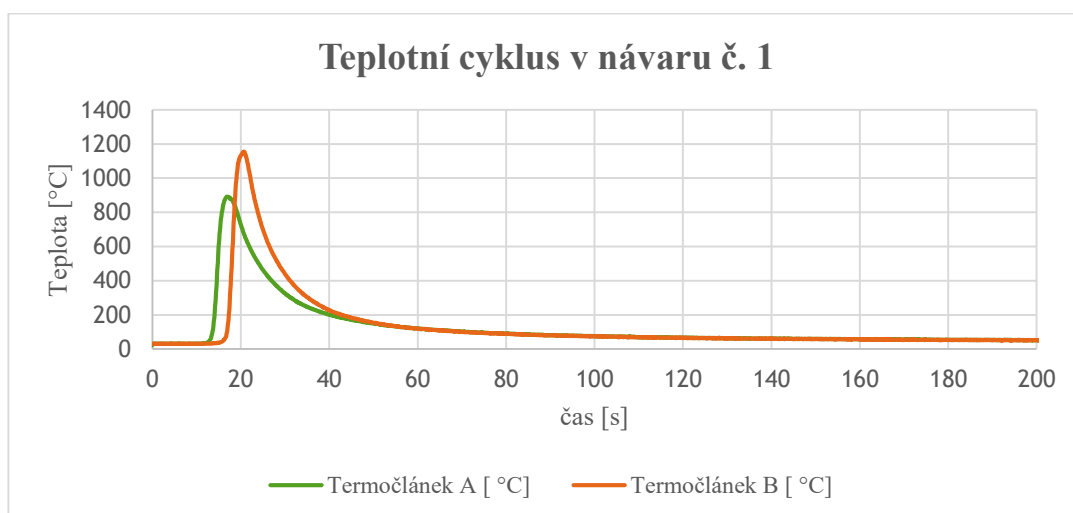
Pro změření přesné vzdálenosti bylo nutné desku s návary rozřezat a udělat menší vzorky jednotlivých návarů viz obrázek 4.7 vlevo. Na každém vzorku těchto jednotlivých návarů bylo nutné provést příčné řezy v místech, kde se nacházeli otvory pro zavedení termočlánců, viz obrázek 4.7 vpravo. Tak aby na ploše metalografického snímku bylo zjevné, kde byl termočlánek přivařen. A bylo možné provést přesné měření vzdáleností termočláncu od povrchu podkladového návaru.

Tabulka 4.2 – Přibližné vzdálenosti termočlánků od povrchu návaru a maximální teploty při opravném svařování

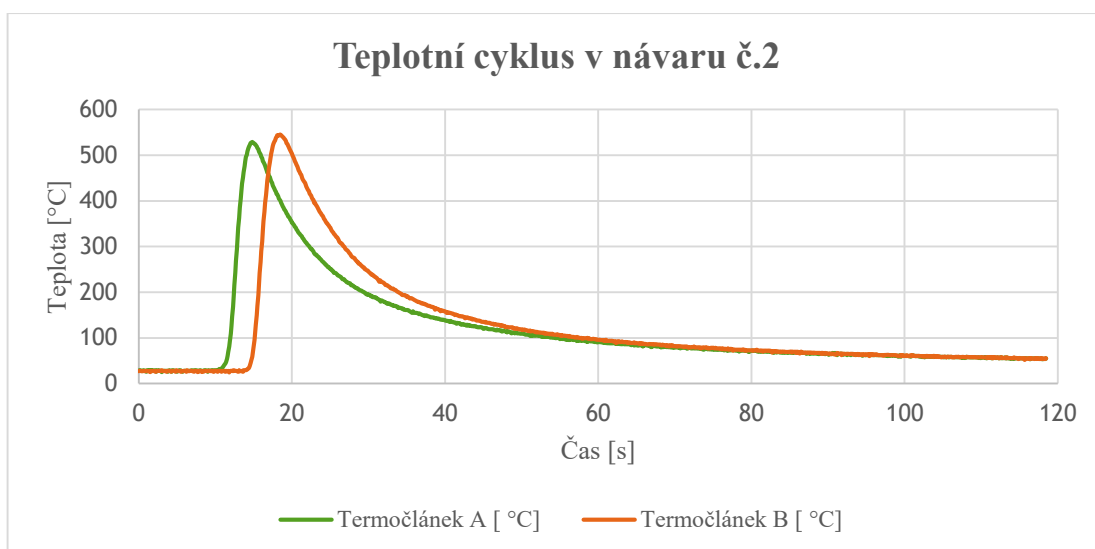
Označení parametru	Návar č. 1	Návar č. 2	Návar č. 3
Tloušťka návaru měřená posuvným měřítkem od povrchu základního materiálu [mm]	2,11	3,26	7,3
Maximální teplota pro termočlánek A [°C]	882	519	335
Vzdálenost termočlánku A [mm]	2,09	3,95	7,64
Maximální teplota pro termočlánek B [°C]	1 145	535	345
Vzdálenost termočlánku B od povrchu návaru měřená posuvným měřítkem [mm]	1,67	2,2	7,47



Obrázek 4.5 – Vzorek návaru č. 2 pro zjištění přesných vzdáleností termočlánků od povrchu nosného návaru



Obrázek 4.6 – Grafické znázornění teplotního cyklu v návaru č. 1



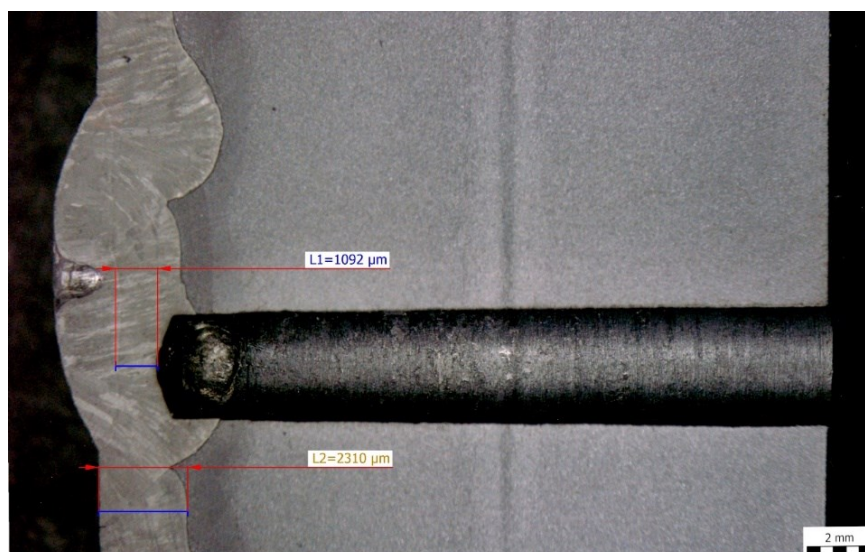
Obrázek 4.7 – Grafické znázornění teplotního cyklu v návaru č. 2

4.3 Měření skutečných vzdáleností termočláneků od rozhraní návaru a tloušťek návarů

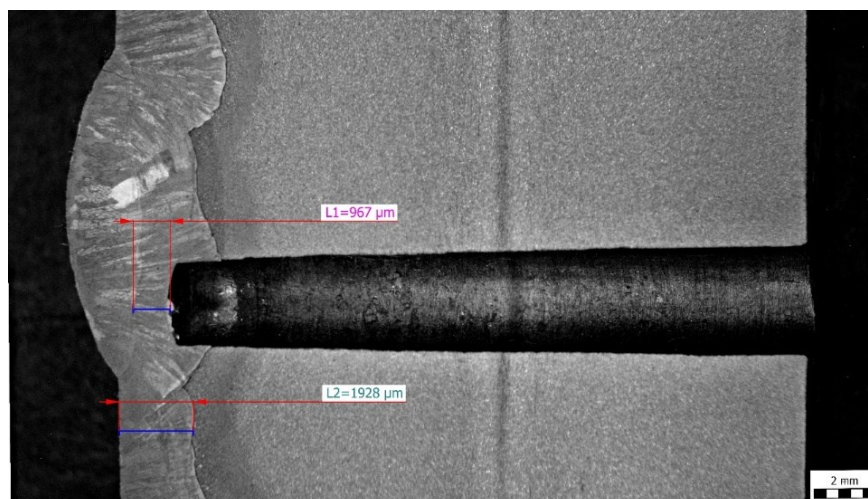
Měření skutečných vzdáleností jsem provedl pomocí počítačového softwaru Quick Photo Industrial a tyto hodnoty shrnul do tabulky 4.3. Měření bylo provedeno od míst, kde byly přivařeny termočláanky po hranici ztavení pro opravný návar. Dále jsem provedl měření tloušťek vrstev návaru v oblasti termočláanku, které se nachází v tabulce 4.4.

Tabulka 4.3 – Skutečné vzdálenosti termočláanku odečtené z metalografických snímků

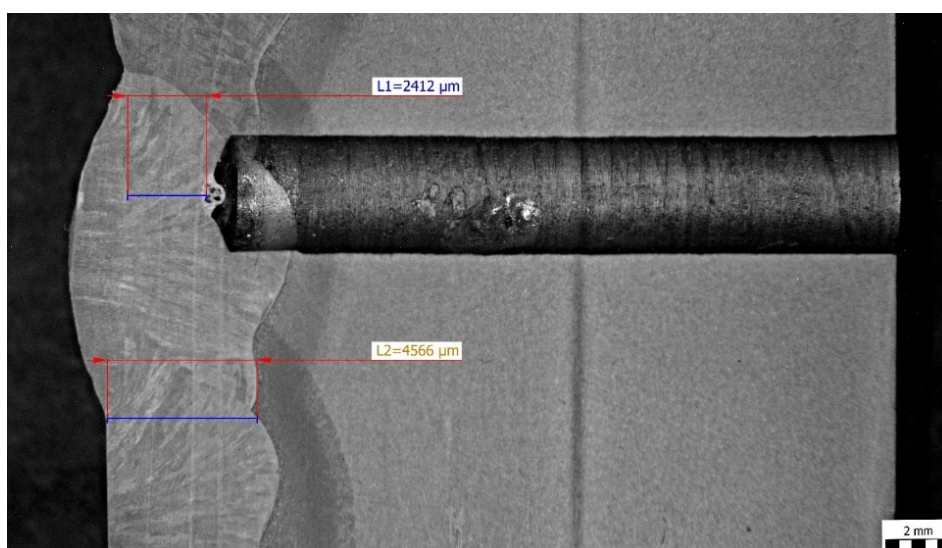
Označení parametru	Návar č. 1	Návar č. 2	Návar č. 3
Vzdálenost termočláanku A od rozhraní opravné vrstvy[mm]	1,092	2,412	5,978
Vzdálenost termočláanku B od rozhraní opravné vrstvy[mm]	0,967	3,169	6,294



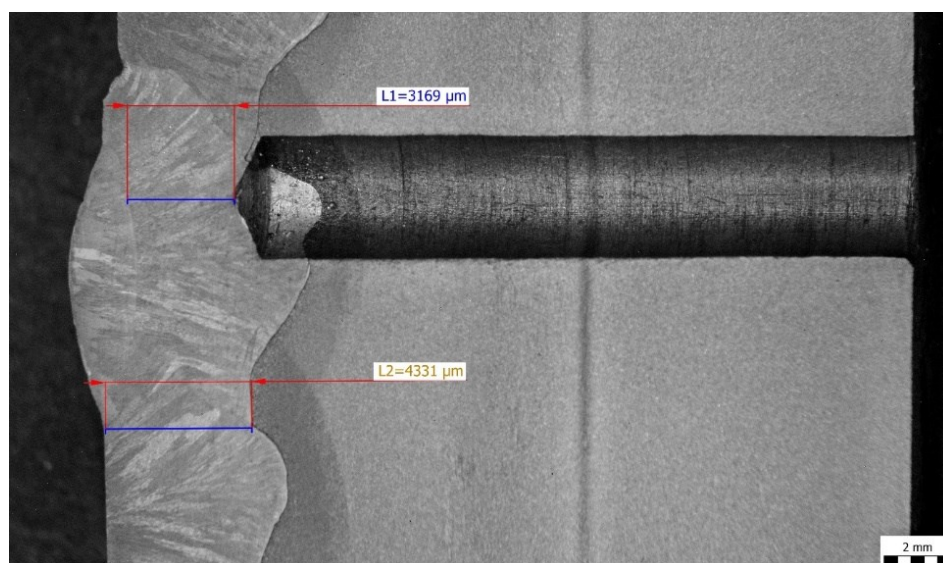
Obázek 4.8 – Návar č. 1, umístění termočláanku A



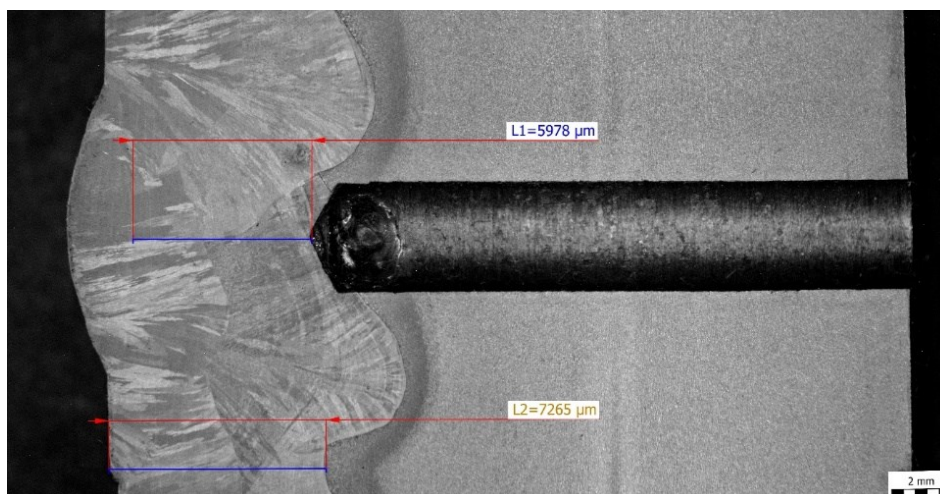
Obrázek 4.9 – Návar č. 1, umístění termočlánu B



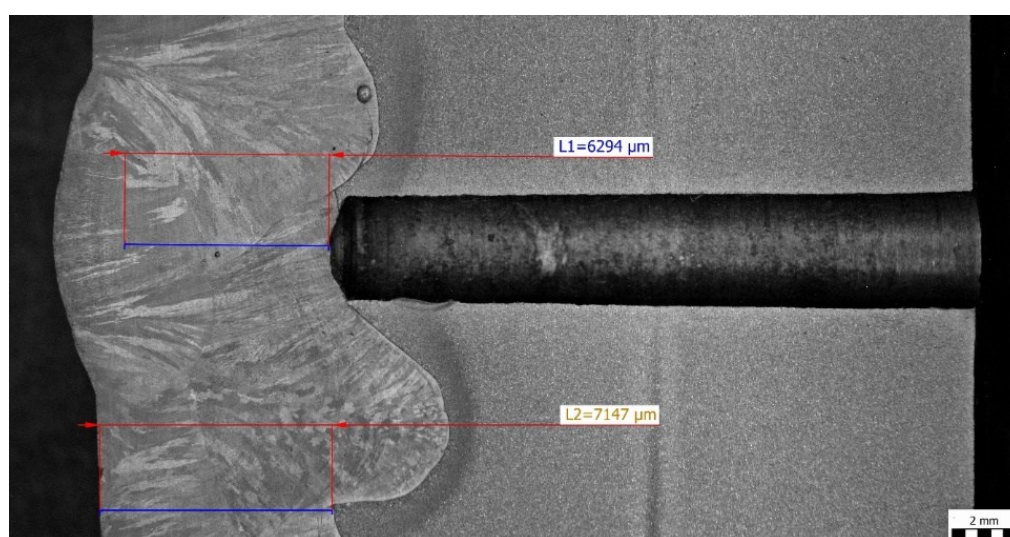
Obrázek 4.10 – Návar č. 2, umístění termočlánu A



Obrázek 4.11 – Návar č. 2, umístění termočlánu B



Obrázek 4.12 – Návar č. 3, umístění termočlánku A



Obrázek 4.13 – Návar č. 3. umístění termočlánku B

Tabulka 4.4 Porovnání naměřených hodnot návarů

Parametr	Návar 1		Návar 2		Návar 3	
	T_A	T_B	T_A	T_B	T_A	T_B
Tloušťka návaru austenitu změřená posuvným měřítkem [mm]	2,11		3,26		7,3	
Skutečná tloušťka austenitického návaru [mm]	2,31	1,928	4,331	4,566	7,265	7,147

4.4 Analytický výpočet

Maximální hodnoty teplot teplotních cyklů T_{\max} v různých hloubkách návaru byly porovnány s hodnotami vypočítanými dle analytických modelů. Tyto hodnoty byly vypočítány dle analytických modelů z teoretické části. Výpočet proběhl v programu Excel, pro přehlednost jsem uvedl zde jen výsledky a použité vztahy.

$$T - T_0 = \sqrt{\frac{2}{\pi \cdot e}} \cdot \frac{q}{2 \cdot \delta \cdot \rho \cdot R} \quad (14)$$

$$T - T_0 = \left(\frac{2}{\pi \cdot e} \right) \cdot \frac{q}{\rho \cdot c \cdot v \cdot R^2} \quad (15)$$

$$T_{\max j}(r) - T_0 = \sqrt{\frac{2}{\pi \cdot e}} \cdot \frac{q \sqrt{a_j}}{v \cdot (\delta_1 \cdot \sqrt{c_1 \cdot \rho_1 \cdot \lambda_2} + \delta_2 \cdot \sqrt{c_1 \cdot \rho_1 \cdot \lambda_2})} \cdot \frac{1}{|r|} \quad (7)$$

Tabulka 4.5 Výsledky analytických výpočtů

Parametr	Návar 1		Návar 2		Návar 3	
	T _A	T _B	T _A	T _B	T _A	T _B
Tloušťka návaru austenitu změřená posuvným měřítkem [mm]	2,11		3,26		7,3	
Skutečná tloušťka austenitického návaru [mm]	2,31	1,928	4,331	4,566	7,265	7,147
T _{max} experiment[°C]	892	1155	519	535	335	340
Svařovací rychlost [cm.min ⁻¹]	17,45		24,11		22,28	
Vnesené teplo do návaru [kJ.mm ⁻¹]	0,52		0,429		0,407	
Skutečná vzdálenost od rozhraní návaru k termočlátku [mm]	1,092	0,967	3,169	2,412	5,978	6,294
Vzdálenost ve, které by se měla nacházet teplota T _{max} , řešení pro tlusté plechy (3D), podle rovnice (15) [mm]	6,13	5,37	6,9	6,78	9,02	8,50
Vzdálenost ve, které by se měla nacházet teplota T _{max} , podle řešení pro heterogenní spoj, podle rovnice (7) [mm]	3,74	2,9	4,5	4,34	7,2	7,1

Tabulka 4.6– Hodnoty odchylek vypočítaných vzdáleností pro T_{\max} , od skutečné vzdálenosti termočlánku

Parametr	Návar 1		Návar 2		Návar 3	
	T_A	T_B	T_A	T_B	T_A	T_B
Odchylka vypočítané vzdálenosti pro T_{\max} teplotního cyklu, od skutečné polohy termočlánku. Řešení pro tenké plechy [mm]	+0,648	+0,383	-1,149	-0,472	-2,89	-3,334
Odchylka vypočítané vzdálenosti pro T_{\max} teplotního cyklu, od skutečné polohy termočlánku. Řešení pro tlusté plechy [mm]	+5,038	+4,403	+3,731	+4,368	+3,04	+2,52
Odchylka vypočítané vzdálenosti pro T_{\max} teplotního cyklu, od skutečné polohy termočlánku. Řešení pro heterogenní spoj [mm]	+2,648	+1,933	+1,331	+1,928	+1,22	+0,806

- Pokud je u hodnoty odchylky znaménko (+) znamená to, že analytický model udával větší vzdálenosti, než byly zjištěné při experimentu.
- Pokud je u hodnoty odchylky znaménko (-) znamená to, analytický model udával menší vzdálenosti, než byly zjištěné při experimentu.

Tabulka 4.7 Tabulka minimálních potřebných tloušťek vrstev návarů

Výpočtový model	Hodnota tloušťky návaru, pro svařovací parametry použité pro návar č. x		
	1	2	3
Pro tenké plechy (2D), rovnice (14)	2,19	1,5	1,39
Pro tlusté plechy (3D), rovnice (15)	6,85	5,82	6,05
Pro heterogenní spoj, rovnice (7)	4,67	3,2	3,1

4.5 Numerická simulace

V současné době kdy prudce rostou požadavky na rychlost a kvalitu výroby je zapotřebí využívat simulačních programů, které jsou schopné simulovat a predikovat problémy vzniklé při výrobních procesech. Těchto programů se zpočátku využívali pouze pro letecký a kosmický průmysl, ale dnes je možné, je nalézt v mnoha průmyslových firmách. Pro simulace svařovacích procesů existuje řada simulačních softwarů, mezi které patří Sysweld, Simufact Welding, nebo Ansys. Těchto výpočetních nástrojů lze použít pro

predikci velikosti teplem ovlivněné zóny, výpočet průběhu napětí a deformací ve svaření, nebo také je možné predikovat lokální strukturální přeměny v okolí svaru a tvrdosti v oblasti svaru.

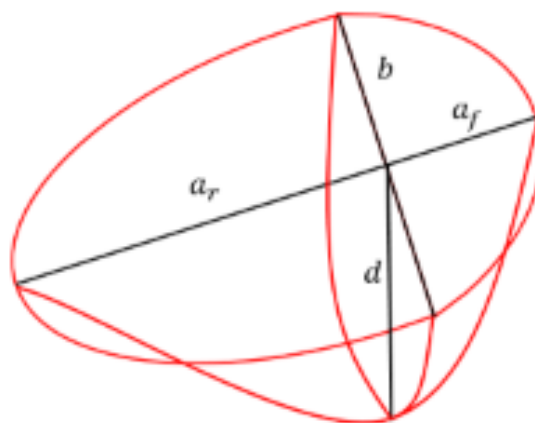
Simufact Welding

Simufact Welding je jedním z nejmodernějších výpočetních nástrojů pro numerické simulace svařovacích procesů. Tento software poskytuje široké spektrum možností řešení svařovacích procesů. Mezi tyto řešitelné procesy patří svařování elektrickým obloukem, svařování elektronovým a laserovým paprskem, odporové svařování a pájení. Kromě simulace svařovacích procesů, je zde možné simulovat procesy tepelného zpracování. Při řešení termomechanických úloh se zde používá metoda konečných prvků FEM. Tento způsob řešení spočívá, v rozdělení kontinuálního tělesa na určitý počet prvků, ve kterých v průběhu simulace se provádí výpočet sledovaných veličin.

Aby bylo dosaženo přesných a reálných výsledků ze simulací svařovacího procesu, je nutné znát mechanické a tepelně – fyzikální vlastnosti použitých materiálů. Software Simufact Welding disponuje širokosáhlou knihovnou materiálů, ve které se nachází několik set v praxi používaných materiálů. Při tvorbě simulace, je však nutné tyto data z knihovny materiálů porovnat se skutečnými materiálovými vlastnosti, protože tyto hodnoty se mohou od použitých materiálů výrazně lišit a výsledky simulace mohou být velice zkreslené. Kromě definování materiálů a jejich vlastností, je zde nutné definovat jednotlivé svařované součásti formou 3D modelu, který je možné vytvořit v prostředí programu, nebo ho importovat z jiného CAD modeláře. Dalším bezpodmínečně nutným definovaným parametrem je svařovací trajektorie a tepelný zdroj.

Simufact Welding nabízí dva modely zdrojů tepla, které jsou nutné pro vznik svarové lázně v průběhu simulace. Jedním možným modelem tepelného zdroje je ve tvaru dvojitého elipsoidu tzv. Godlakův dvojitý elipsoid, který je vhodný pro simulování technologických procesů obloukových metod svařování. Pro Godlakův elipsoid jsou charakteristické tyto parametry:

- a_f – přední délka elipsoidu,
- a_r – zadní délka elipsoidu,
- b – šířka elipsoidu,
- d – hloubka elipsoidu.

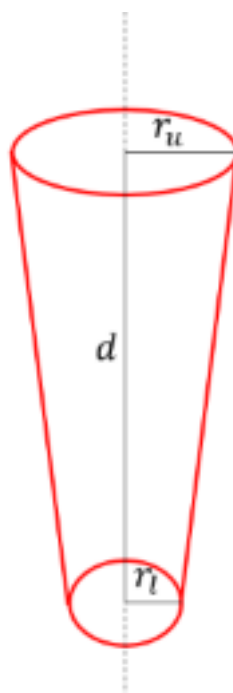


Obrázek 4.14 – Model godlakova zdroje tepla ze softwaru Simufact Welding

Jednotlivé parametry tvaru zdroje tepla lze zjistit z metalografických snímků pořízených na základě experimentálního svařování.

Další možností tvaru tepelného zdroje je tvar komolého kužele. Komolý kužel je vhodný pro simulace metod kde se využívá jako tepelný zdroj paprsek, tedy technologie svařování elektronovým paprskem, svařování laserem, nebo řezání plamenem. Pro tento zdroj tepla jsou charakteristické tyto parametry:

- poloměr horní kružnice kužele,
- poloměr spodní kružnice kužele,
- délkou kužele.



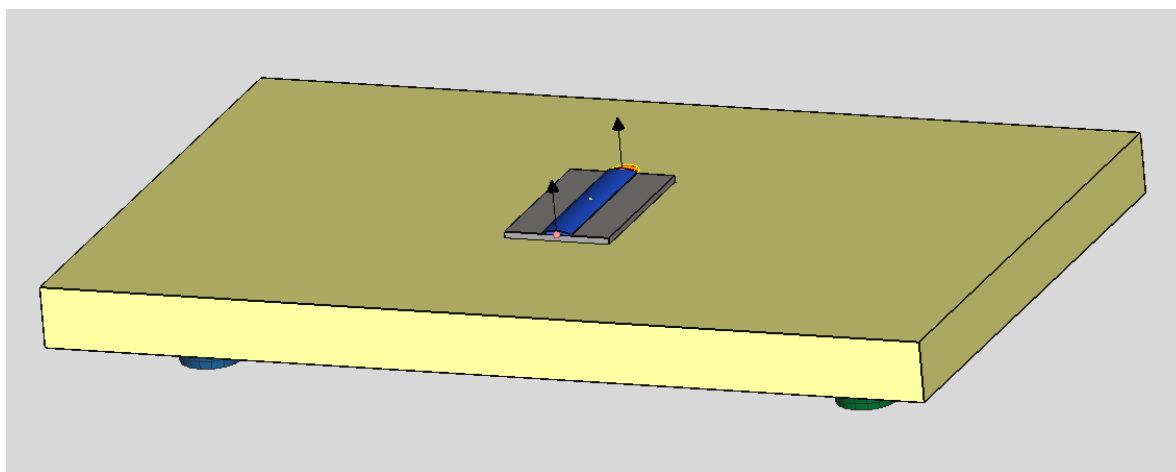
Obrázek 4.15 – Model zdroje tepla ve tvaru komolého kužele ze softwaru Simufact Welding

4.6 Vstupní parametry pro simulaci

V této kapitole budou popsány nezbytné vstupní parametry pro tvorbu simulace opravy heterogenního spoje. Pro tvorbu simulace jsem použil modul pro obloukové svařování, který se nachází v softwaru Simufact Welding.

Tvorba třírozměrného modelu

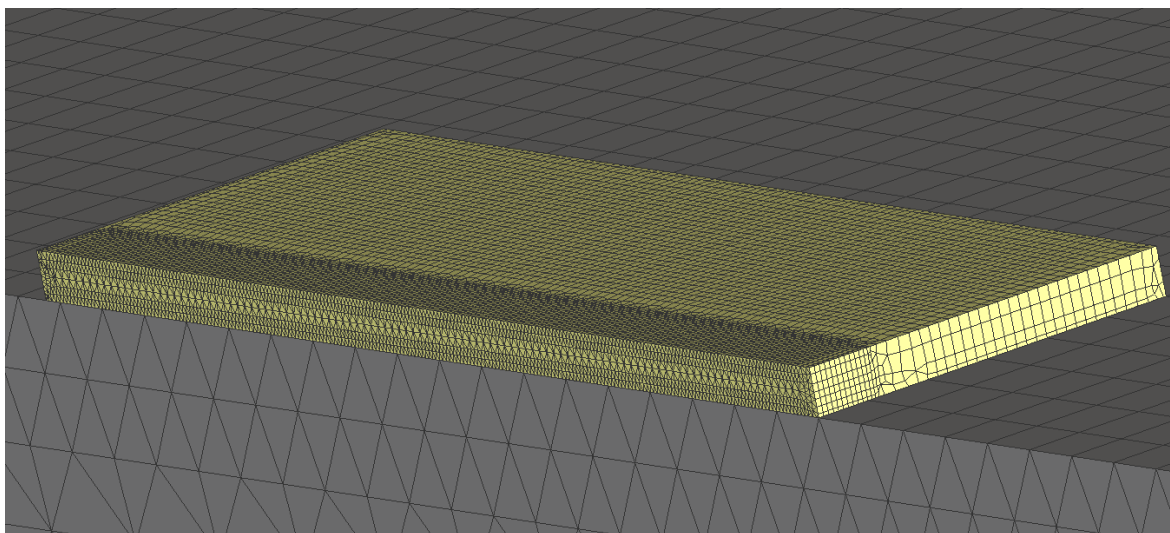
Pro hotovení modelu k simulaci opravného svařování nebylo nutné žádného sofistikovaného modelářského softwaru, protože se jednalo o poměrně tvarově jednoduchou součást. Podkladový materiál jsem zhotovil se stejnými rozměry, jako byl použit při experimentu, jednalo se o desku o rozměrech 295 x 185 x 20 mm. Na kterou byly nanесeny tři návary o rozměrech 55 x 35 x 2,12 mm, 55 x 35 x 4,485 mm a 55 x 35 x 7,2 mm. Hodnoty tloušťky návarů, byly stanoveny průměrnou hodnotou naměřených skutečných vrstev návarů v oblasti jednotlivých termočlánků. Pokud by bylo nutné simulovat svařovací procesy na tvarově složitějších součástech, lze tyto modely importovat do simufaktu z Autodesk Inventor, nebo jiných podobných modelářských programů. Součástí modelu byla také nanášená svarová housenka, ta byla zhotovena na základě odměřených rozměrů z metalografických snímků a vymodelována pomocí modulu, který je obsažen v Simufact Welding.



Obrázek 4.16 – Model navařené austenitické vrstvy na podkladovou nízkolegovanou ocel ze softwaru Simufact Welding

Tvorba síťování

Pro tvorbu síťování existuje několik variant provedení, které se liší ve tvarech jednotlivých elementů. Simufact Welding nabízí síťování ve formě tříbokých jehlanů a kvádrů. Pro tvorbu sítě pro podkladovou desku jsem použil síťování s kvádry o velikosti 3 mm. Obdobně jsem to provedl pro návar. Pro návar jsem opět pro síťování použil typ elementů jako kvádr, které měly délku hrany 1 mm a v místě kde se pokládala opravná housenka, jsem provedl zjemnění sítě, které bylo nastavené na hodnotu 1. Toto zjemnění sítě slouží k zpřesnění dosažených výsledků rozložených teplot. Tímto způsobem jsem provedl síťování pro všechny tři simulace návarů.



Obrázek 4.17 – Detail provedeního síťování v oblasti návaru

Definování materiálu

Pro podkladový materiál byl nastaven materiál S355J2G3 a pro návar 316L-w-sw, který odpovídá přídavnému materiálu ve formě drátu materiálu 316L.

Konfigurace tepelného zdroje

Pro simulaci celého experimentu, bylo zapotřebí vytvořit tři různé zdroje tepla, protože na jednotlivých návarech při měření na metalografických snímcích byly naměřeny odlišné hodnoty závaru a svařovací rychlosti při navařování jednotlivých návarů se také mírně lišily. Jako zdroj tepla jsem použil Godlakův model, parametry tohoto zdroje byly odměřeny z metalografických snímků návarů, tak aby se simulace blížila co nejvíce provedenímu experimentu. Další nutným parametrem pro definici zdroje je také jeho trajektorie při svařování. Pro tuto simulaci však stačili dva body tvořící přímku, které se nacházeli na povrchu návaru.

Tabulka 4.8 – Parametry tepelného zdroje

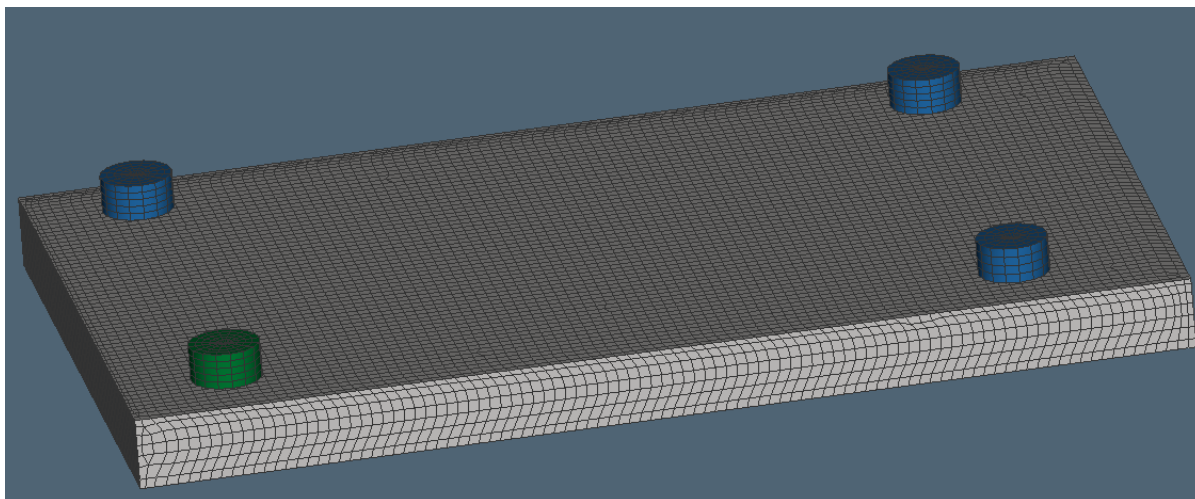
Parametr tepelného zdroje	Návar 1	Návar 2	Návar 3
Svařovací napětí [V]	21	21	21
Svařovací proud [A]	90	90	90
Rychlost svařování [cm.s^{-1}]	17,42	21,11	22,28
Účinnost přenosu tepla [-]	0,8	0,8	0,8
Hloubka svarové čočky [mm]	0,985	1,132	0,963
Přední délka svarové čočky [mm]	4,6	4,6	4,6
Zadní délka svarové čočky [mm]	7,0	7,0	7,0
Vnesená tepelná energie [kJ.mm^{-1}]	0,52	0,429	0,407
Gausův poměr	0	0	0

Definování času výpočtu a jeho krokování

Pro výpočet simulace je nutné definovat časový interval, v kterém se má výpočet odehrávat. Samotná délka svařovacího procesu je definována rychlostí svařování, ale tento časový parametr slouží především pro modelování ochlazování svařovaného materiálu. Jelikož předmětem experimentu je především maximální teplota na rozhraní austenitického návaru a podkladové desky z konstrukční oceli, bylo již zmíněné ochlazování irelevantní. Kromě nastavení tohoto času, je také důležité zvolit vhodnou hodnotu krokování výpočtu. Tato hodnota určuje počet výpočtů veličin v celém časovém intervalu simulace, také od hodnoty krokování se odvíjí přesnost a délka výpočtu celé simulace. Tuto hodnotu je možné nechat zvolit automaticky, nebo jí zvolit vlastnoručně. Pro výpočet všech tří návarů jsem zvolil hodnotu kroku 0,1 s, pro výpočet teplotních cyklů a zjištění maximálních hodnot na rozhraní návaru a podkladového materiálu, to byla dostatečná hodnota. Této hodnotě se rovnala i frekvence záznamu teplot při měření teplotních cyklů při experimentu.

Definování upnutí svařence

Aby mohl být proveden výpočet, je nutné definovat minimálně jeden fixní bod svařence, jinak nemůže být simulace spuštěna. Zadání fixních bodů slouží zejména pro výpočty napětí v pevně upnutých svařencích, u kterých se tímto zamezuje deformací během svařování. Pro replikaci experimentu simulací a porovnání jeho výsledků, jsou nejdůležitější nejvyšší teploty v oblasti návaru, a metoda upnutí byla nepodstatná. Jediným důvodem, může být odvod tepla ze svařence, ale vzhledem že se pokládala jen jedna housenka, tak odvod tepla těmito upínkami je minimální. Pro model návarů jsem definoval jeden fixní bod, který simuluje pevné upnutí a tři podložky, které simulují volné položení.



Obrázek 4.18 – Znáznornění upnutí svařence při simulaci v Simufact Welding

4.7 Provedení výpočtu simulace

Po zadání všech vstupních parametrů následovalo definování veličin, které chceme počítat a sledovat. Vzhledem k tomu že byly zapotřebí jen průběhy teplot v oblasti návaru, tak jsem pro výpočet nastavil pouze teplotní analýzu. Simufact Welding však nabízí také

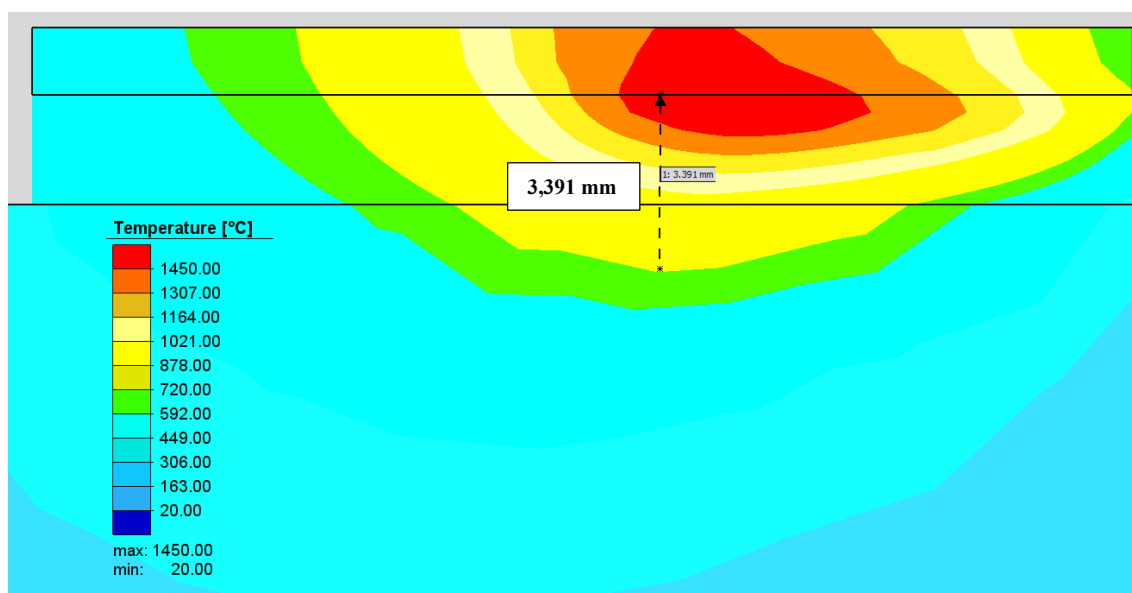
simulace strukturálních změn v materiálech a výpočet průběhů napětí ve svařenci a jeho deformace. Tyto možnosti by však značně prodloužili dobu výpočtů a to je nežádoucí. Doba výpočtů jednotlivých návarů činila cirká tři hodiny. Výhodou je, že Simufact Welding nabízí funkci, která umožňuje vytvoření sekvenci výpočtů, které chceme provést a člověk se tak nemusí nacházet u počítače a zadávat jednotlivé úlohy postupně.

4.8 Výsledky numerické simulace

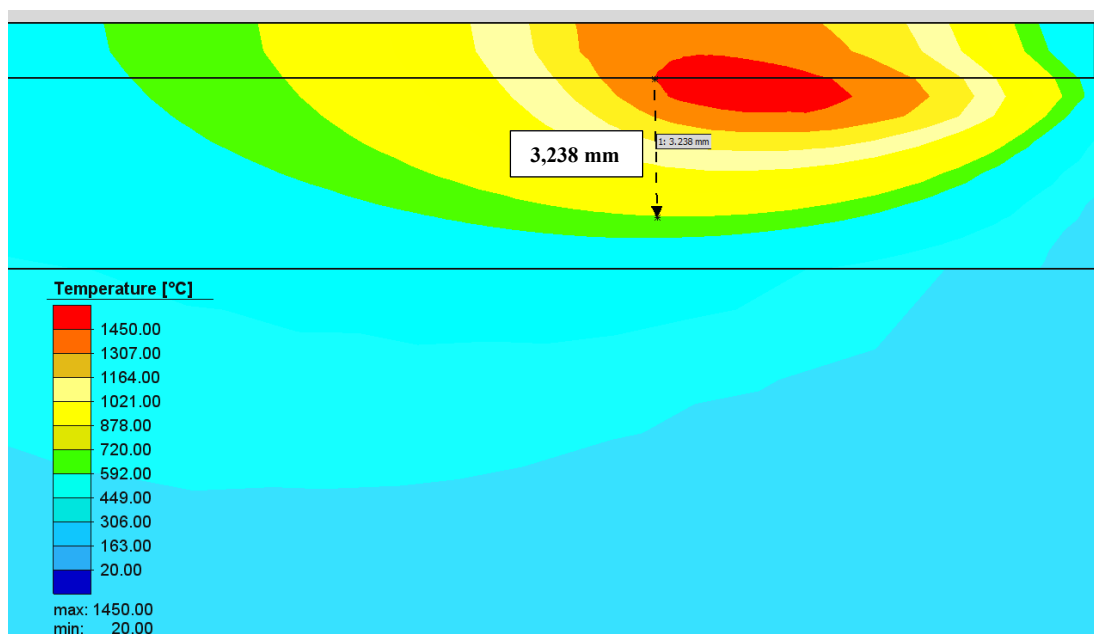
Z programu Simufact Welding je možné prezentovat výsledky simulací v různých formách. Jednou z nich je ve formě grafů, které jsou pořízeny z bodů, které byly definovány před začátkem výpočetního procesu. Tyto body jsem definoval na stejných místech, jako byly umístěny termočlánky při provádění experimentu. Grafy pořízené simulací, budou porovnány v následující kapitole, aby byly zjevné případné nepřesnosti mezi simulací a reálným experimentem. Další možností prezentace výsledků simulace je pomocí funkce weld monitor, která poskytuje obraz průběhu svařování, kde je rozložení teplot znázorněn pomocí škálování barev.

Termální analýza návaru a měření vzdálenosti teploty Ac₁ od povrchu návaru

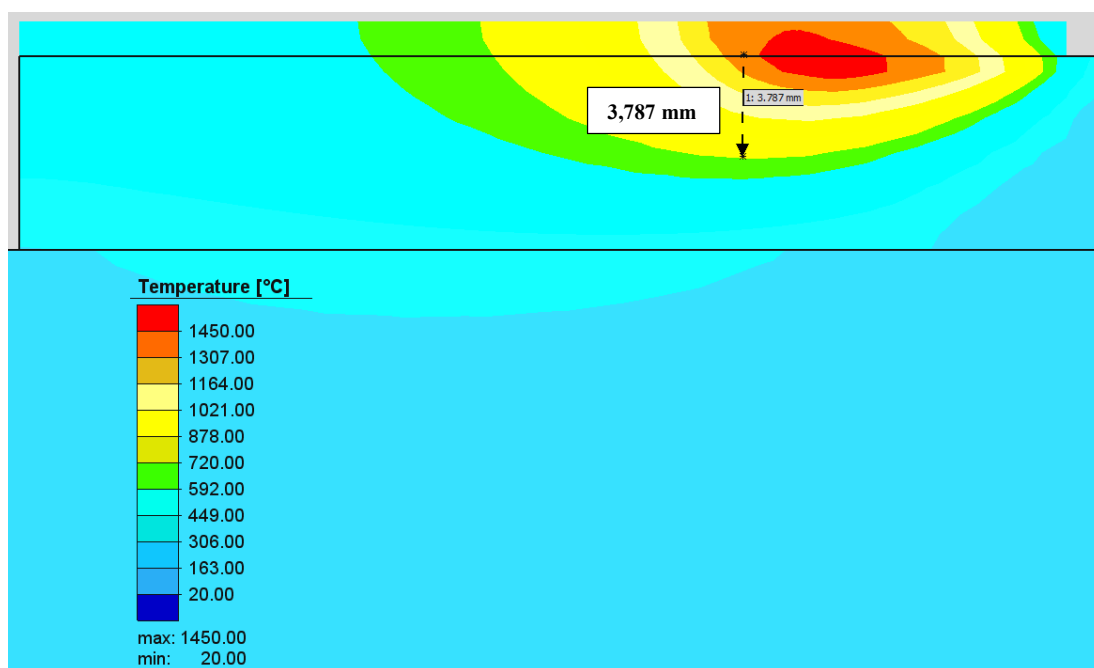
Aby bylo možné určit vzdálenost izotermy pro teplotu Ac₁, nastavil jsem zelenou škálu barev pro teploty na hodnotu 720 °C, což je teplota Ac₁ pro podkladový materiál S355. Následovně jsem provedl měření vzdálenosti této izotermy k povrchu podkladového austenitického návaru. Tyto vzdálenosti, které jsou určeny numerickou simulací, budu porovnávat s výsledky vzdáleností určené pomocí analytických modelů.



Obrázek 4.19 – Teplotní pole v návaru č. 1



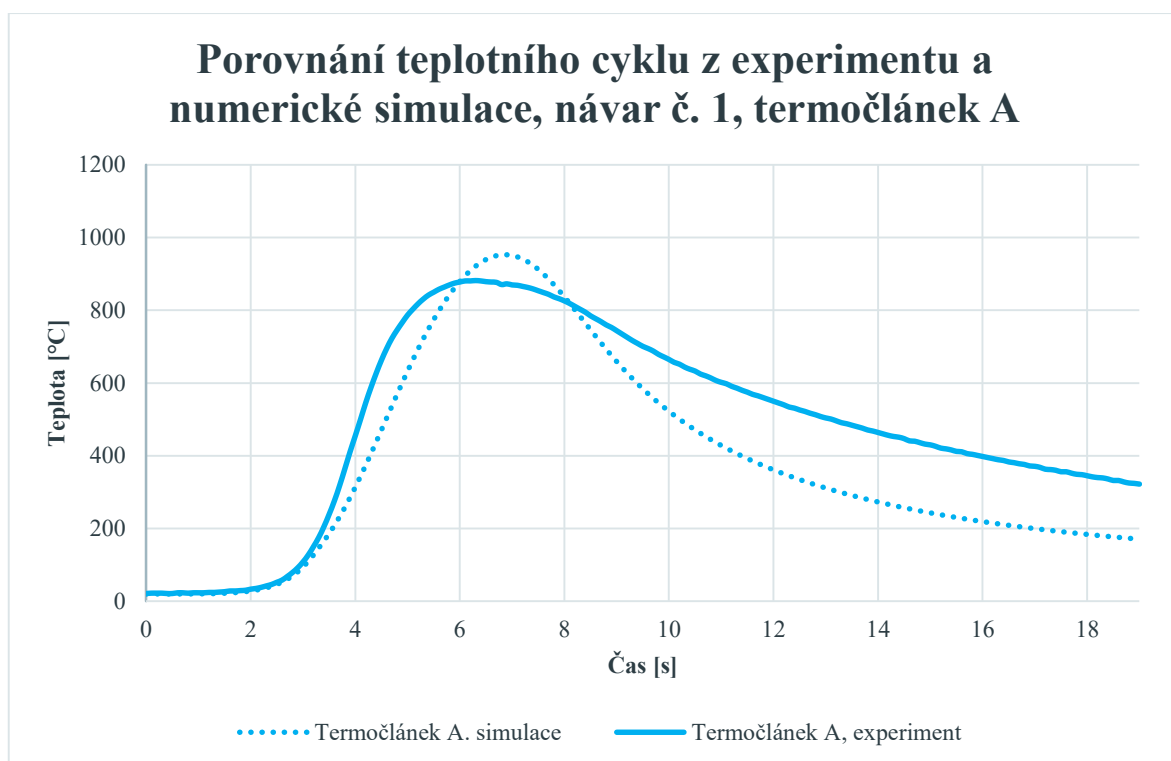
Obrázek 4.20 – Teplotní pole v návaru č. 2



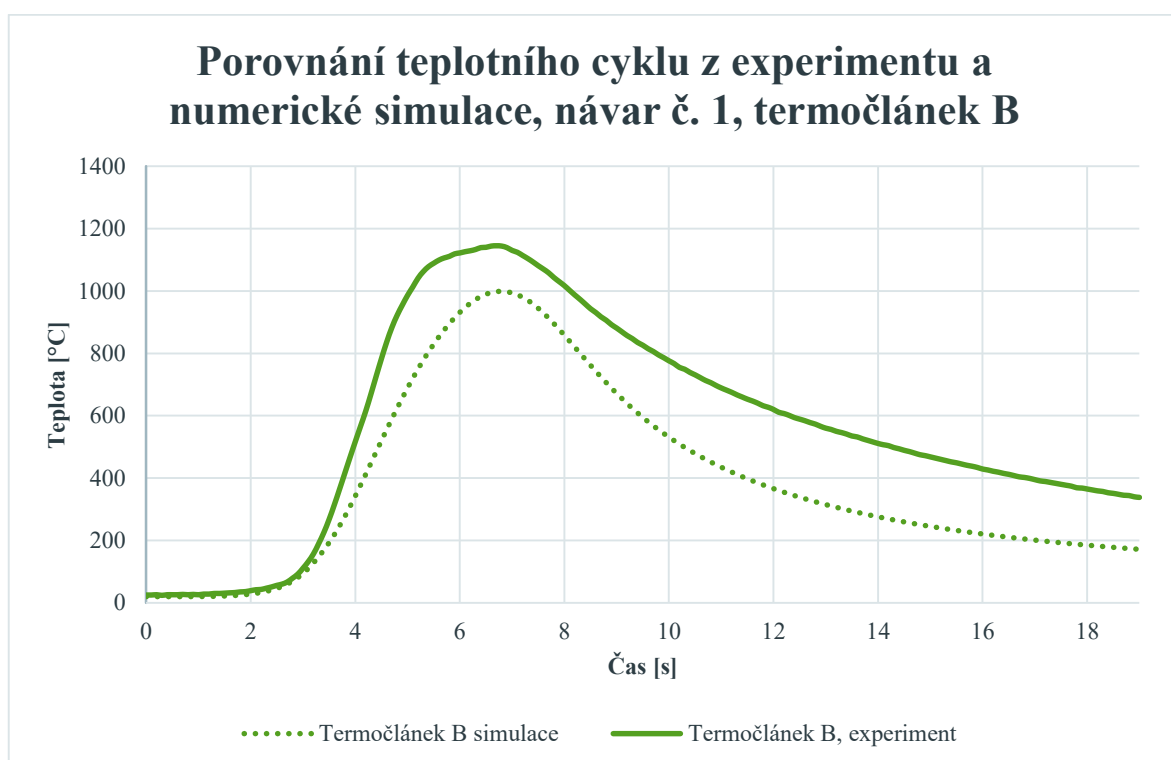
Obrázek 4.21 – Teplotní pole v návaru č. 3

4.9 Porovnání experimentu s výsledky numerické simulace a analytického výpočtu

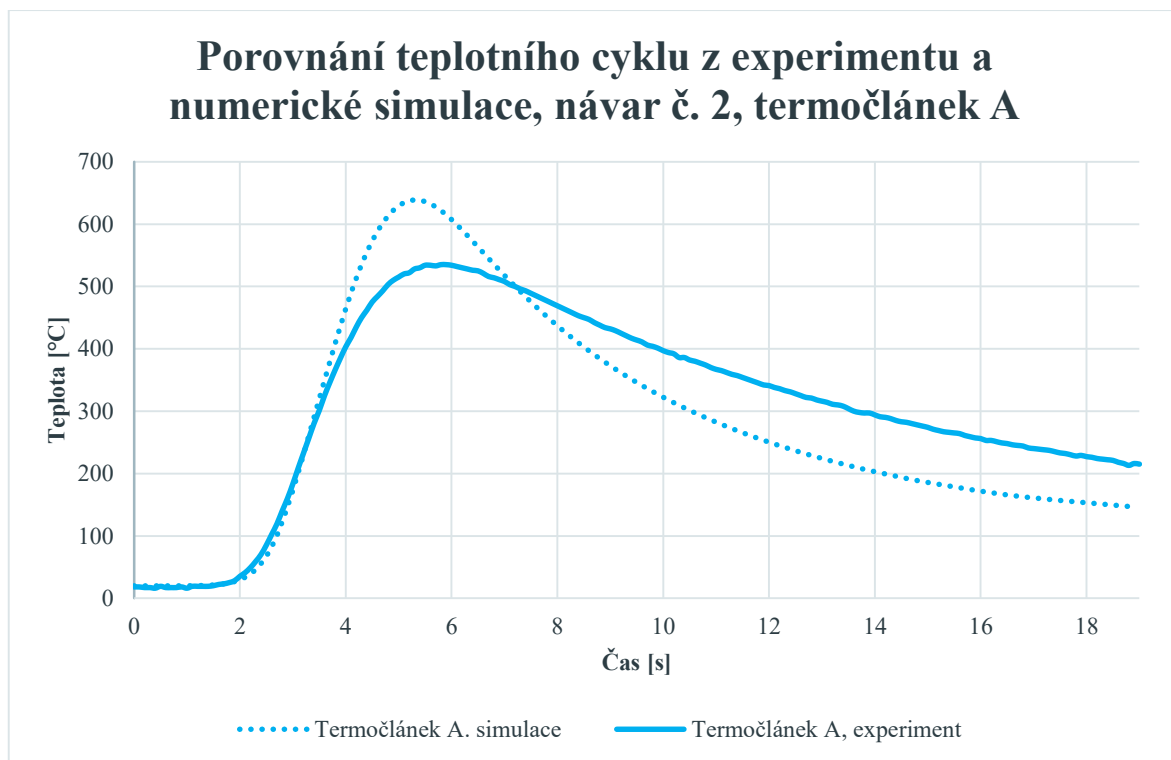
Vzhledem k tomu že analytické modely a simulace v této práci nezahrnují všechny aspekty reálného procesu svařování, tak ve výsledcích existují mírné odchylky od reality. Aby byly na první pohled zjevné rozdíly výsledků použitých metod analytických výpočtů a simulací, shrnul jsem výsledky do grafů a tabulek. Tyto data budou zmíněny v následující kapitole, kde budou projednány možné důvody odchylek jednotlivých výpočtů.



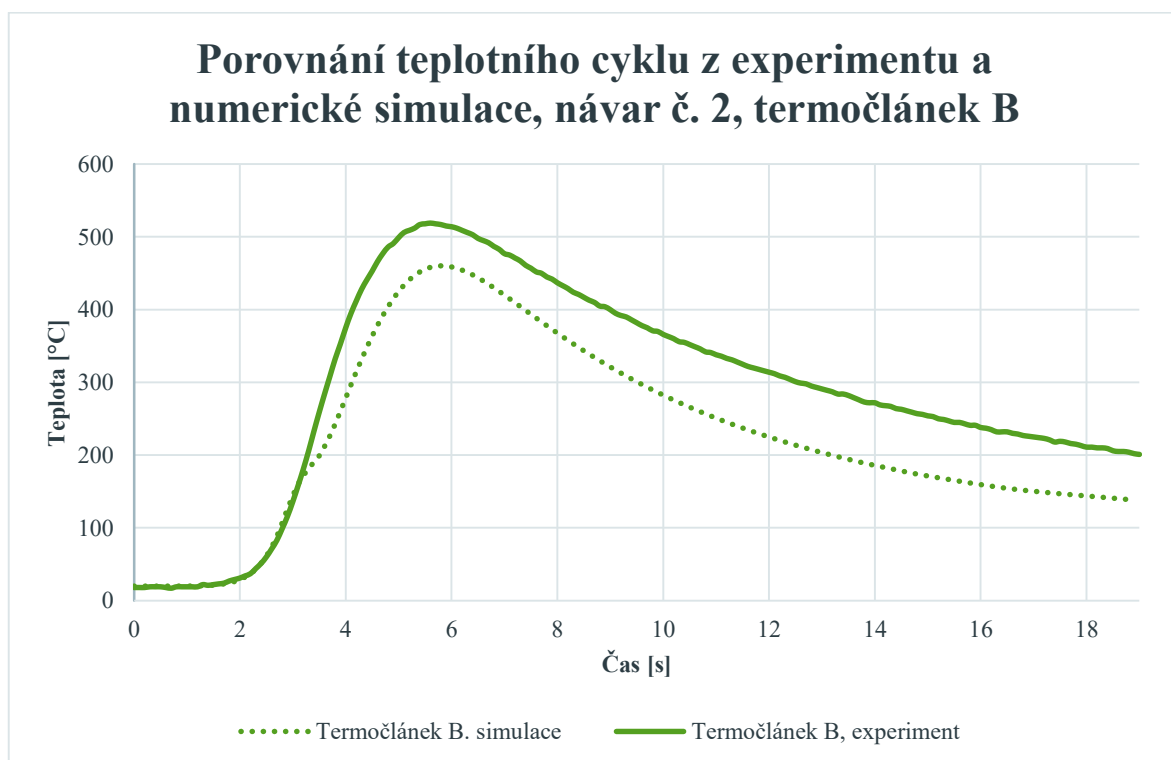
Obrázek 4.22 – Grafické porovnání teplotních cyklů pořízené z experimentu návaru č. 1 a numerické simulace (termočlánek A)



Obrázek 4.23 – Grafické porovnání teplotních cyklů pořízené z experimentu návaru č. 1 a numerické simulace (termočlánek B)



Obrázek 4.24 – Grafické porovnání teplotních cyklů pořízené z experimentu návaru č. 2 a numerické simulace (termočlánek A)



Obrázek 4.25 – Grafické porovnání teplotních cyklů pořízené z experimentu návaru č. 2 a numerické simulace (termočlánek B)

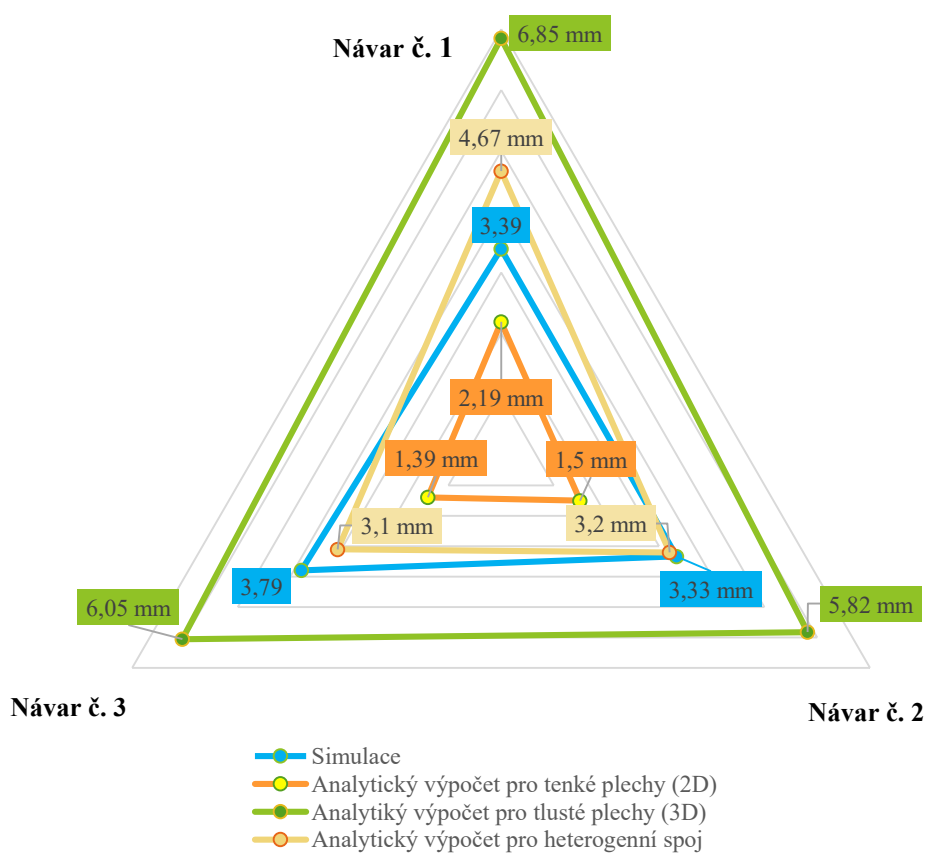
Tabulka 4.9 – Porovnání maximálních hodnot teplotních cyklů mezi numerickou simulací a experimentem

Metoda	Návar 1		Návar 2		Návar 3	
	T _A	T _B	T _A	T _B	T _A	T _B
Experiment	882 °C	1145 °C	535 °C	519 °C	335 °C	345 °C
Simulace	952 °C	997 °C	638 °C	460 °C	235 °C	254 °C
Odchylka	70 °C	148 °C	103 °C	59 °C	100 °C	91 °C

Tabulka 4.10 – Porovnání minimální tloušťky vrstvy návaru, tak aby při svařování nedošlo k strukturnímu ovlivnění podkladového materiálu

Metoda výpočtu	Minimální tloušťka vrstvy návaru č. 1 [mm]	Minimální tloušťka vrstvy návaru [mm]	Minimální tloušťka vrstvy návaru [mm]
Simulace	3,391	3,328	3,787
Analytický výpočet 2D řešení	2,19	1,5	1,39
Analytický výpočet řešení 3D	6,85	5,82	6,05
Analytický výpočet pro heterogenní spoj	4,67	3,2	3,1

Porovnání vypočítaných minimálních vrstev návarů



Obrázek 4.26 – Grafické znázornění odchylek jednotlivých způsobů výpočtů

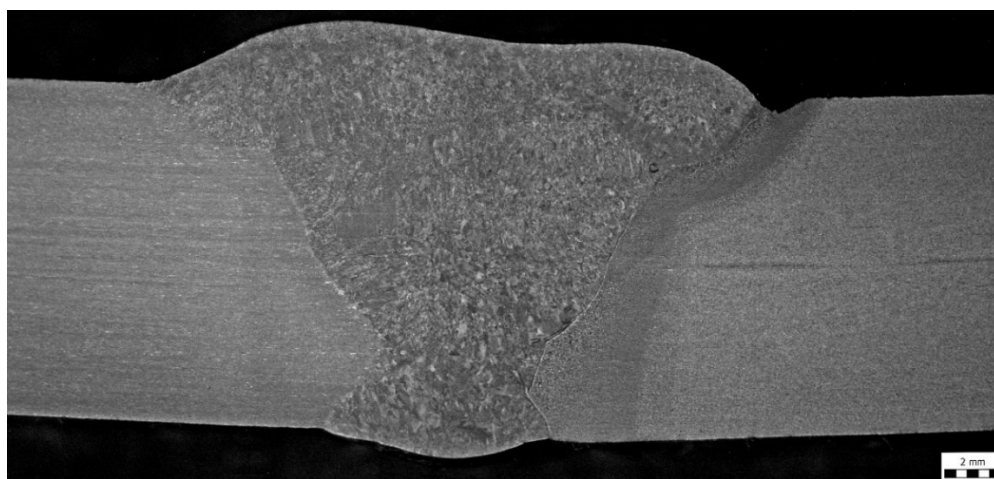
Tabulka 4.11 Tabulka odchylek vypočítaných vrstev návarů

Odchyly potřebné vrstvy návaru vypočítaných analytickou metodou výpočtu od výsledků simulace			
Typ řešení	Výpočty pro svařovací parametry návaru 1	Výpočty pro svařovací parametry návaru 1	Výpočty pro svařovací parametry návaru 1
Analytický výpočet 2D řešení	(-) 1,201	-1,828	(-) 2,397
Analytický výpočet řešení 3D	(+) 3,459	(+) 2,492	(+) 2,263
Analytický výpočet pro heterogenní spoj	(+) 1,279	(-) 0,128	(-) 0,687

- Znaménko (-) symbolizuje, že se výsledek analytického výpočtu tloušťky vrstvy návaru rovnal menší hodnotě než při simulaci.
- Znaménko (+) symbolizuje, že se výsledek analytického výpočtu hodnoty návaru rovnal menší hodnotě než při simulaci.

5 Návrh opravy heterogenního spoje

Součástí mé diplomové práce bylo také určení opravitelnosti heterogenního spoje nízkolegované oceli S355(dle ČSN 11523) a vysokolegované austenitické oceli 316L (X2CrNiMoN22-5-3) o tloušťkách materiálu 12 mm. Při svařování toho materiálů došlo ke vzniku jistých vad, které se nachází v kořenové oblasti v blízkosti. Mým úkolem bylo zjistit opravitelnost těchto vad a určit svařovací parametry tak, aby při opravném svařování nedošlo k ohřevu nízkolegované oceli nad teplotu A_{c1} a nedošlo tak ke vzniku zakalených struktur, které by bylo následovně nutno tepelně zpracovávat. Pro ocel S355 teplota A_{c1} odpovídá 720°C . Na obrázku číslo 5.1 je možné vidět makroskopický metalografický snímek daného heterogenního spoje. Na obrázku 5.2 jsem uvedl detail oblasti, ve které došlo ke vzniku vad.

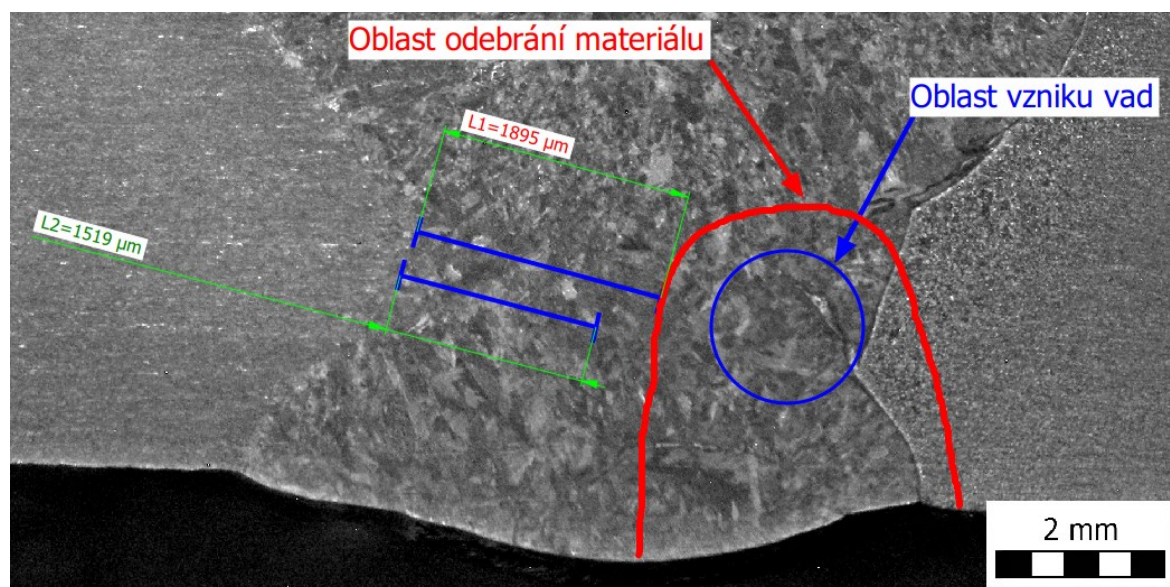


Obrázek 5.1 – Makroskopický snímek heterogenního spoje oceli 316L vlevo a S355 vpravo

Pro opravné svařování navrhuji použít technologii 141 – svařování v ochranné atmosféře s netavicí se elektrodou. Jelikož má ze všech dostupných technologií nejmenší závar a zmenšuje se tak riziko tepelného ovlivnění konstrukční oceli. Pro opravu dále doporučuji použít nejmenší dostupné průměry svařovacích materiálů, aby bylo možné použít co nejmenší svařovací parametry a bylo vneseno do spoje co nejmenší množství tepelné energie na jednotku délky svaru. Dále doporučuji držet se velmi nízkých hodnot teploty interpass. Ideální by bylo, kdyby se čekalo, až materiál vychladne na teplotu okolí.

Pro stanovení dovolené vzdálenosti a ověření svařovacích parametru jsem použil analytickou rovnici, které popisuje vedení tepla v tupém heterogenním spoji. V teoretické části je uvedena pod číslem (7). Zvolil jsem toto řešení, protože výsledky experimentální práce, kde jsem porovnával jednotlivé metody výpočtu, ukazují, že tento vztah má nejmenší odchylky od řešení z numerické simulace, která poměrně přesně kopíruje teplotní cyklus při experimentu. Pro přehlednost ho uvedu i zde. Hodnoty tepelně – fyzikálních hodnot použitých materiálů se nachází v příloze č. 1. Pro výpočet těchto parametrů byla použita hodnota účinnosti tepelného přenosu $\eta = 0,5$. Tato hodnota reprezentuje hodnotu účinnosti pro technologii 141. Pro přehlednost zde uvedu i použitý vztah pro výpočet nutné vrstvy svarového kovu, aby nedošlo k ovlivnění materiálu, který se nachází vlevo na obrázku 5.2.

$$T_{\max j}(r) - T_0 = \sqrt{\frac{2}{\pi \cdot e}} \cdot \frac{\frac{U \cdot I}{v} \cdot \eta \cdot \sqrt{a_j}}{v \cdot (\delta_1 \cdot \sqrt{c_1 \cdot \rho_1 \cdot \lambda_2} + \delta_2 \cdot \sqrt{c_1 \cdot \rho_1 \cdot \lambda_2})} \cdot \frac{1}{|r|} \quad (1.7)$$



Obrázek 5.2 – Detail vzniklých vad při svařování na heterogenním spoji

Hodnota $L1 = 1895 \mu\text{m}$ reprezentuje vzdálenost od hranice ztavení nízkolegované oceli po hranici odebraného materiálu. Hodnota $L2=1519 \mu\text{m}$ reprezentuje dovolenou vrstvu svarového kovu. Pro případné nepřesnosti výpočtu a rozptylu svařovacích

parametrů je zde rezerva, která činí 376 μm . Pro tuto dovolenou vrstvu svarového kovu od hranice ztavení L2, lze svařovací parametry libovolně měnit, zdali bude zachováno vnesené teplo do svarového spoje.

Tabulka 5.1 – Rozsah maximálních svařovacích parametrů pro opravu pro rychlost svařování 20 cm.min^{-1}

Parametr	Hodnoty
Rychlost svařování [cm.min^{-1}]	20
Svařovací napětí [V]	20
Svařovací proud [A]	50
Vnesené teplo na jednotku délky [kJ.mm^{-1}]	0,15

Diskuze dosažených výsledků

Při porovnávání maximálních hodnot teplotních cyklů experimentu a numerické simulace MKP v softwaru Simufact Welding, které byly vždy pořízeny ze dvou odlišných míst návaru činily v absolutní hodnotě v návaru číslo 1 na termočlánek A 70 °C a termočlánek B 148 °C. V návaru číslo 2 tyto odchylky v oblasti umístění termočlánku A dosahovali hodnot 103 °C a v místě termočlánku B tato odchylka dosahovala hodnoty 59°C. A v návaru číslo 3 se odchylky mezi experimentem a numerickou simulací naměřené na termočlánek A rovnali 100 °C a na termočlánek B 91 °C. Tyto odchylky mohou být způsobeny řadou faktorů. Jedním z nich je, že použitý základní materiál S355 je definován chemickým složením s velkým rozptylem. Což může mít za následek, že výpočty simulace probíhají s nepřesně definovanými tepelně – fyzikálními vlastnostmi, jako je tepelná vodivost a tepelná kapacita, nepatrný vliv na výsledky může mít i odchylka hustoty materiálu. Druhým faktorem, který může ovlivnit výsledky odchylek maximálních hodnot teplotních cyklů mezi realitou a experimentem, je definice parametrů svařovacího zdroje. Dalším faktorem, který mohl ovlivnit experiment, je tloušťka návaru z materiálu 316L, která byla navařená na materiál S355. Tato tloušťka totiž je proměnná po celé délce návaru, jelikož to byl návar a hodnoty průvarů jednotlivých navrstvených housek se mírně lišily. Menších odchylek by mohlo vzniknout, zda by pro experiment byly použity plátované plechy, kde toto rozhraní, není tak heterogenní. Posledním faktorem je míra promísení materiálu návaru a podkladového základního materiálu. Míra promísení materiálů v přechodu mezi návarem a základním materiálem totiž mění tepelně – fyzikální vlastnosti. S promísením těchto materiálů nebylo počítáno při numerické simulaci teplotních polí v návaru, proto se také mohou vyskytovat odchylky simulace od reality.

Dalším náplní mé práce bylo porovnání odchylek vypočítaných tloušťek vrstvy návarů numerickým a analytickým způsobem. Tloušťka vrstvy byla určena tak aby při pokládání další vrstvy návaru, nedošlo k tepelnému ovlivnění podkladového základního materiálu. Konkrétně aby na rozhraní vysokolegovaného austenitického návaru a základního materiálu, který byl nízkolegovaná konstrukční ocel S355, nedošlo k ohřevu na teploty A_{c1} materiálu S355. Mohlo by totiž dojít ke vzniku zakalených struktur, které jsou náchylné na vznik trhlin a bylo by nutné, takový svarový spoj tepelně zpracovávat. Nejmenší odchylky vypočítaných vrstev návarů od vrstev návarů určené simulací vykazoval vztah pro tupý heterogenní svarový spoj, ačkoliv tento výpočtový model je určen pro situace, kde se zdroj tepla nachází na rozmezí dvou svařovaných materiálů a hodnoty návarů získané simulací, byly pro úlohu navařování. Druhým nejpřesnějším výpočtovým modelem bylo řešení pro

tenké plechy. Hodnoty tohoto řešení ale však vždy udávali menší hodnoty návaru, nežli bylo potřeba a to může mít při použití v praxi při rozhodování o dovolené vzdálenosti pro svařování od určitého materiálu za následek poškození materiálu. Poslední analytické řešení, které jsem porovnával, bylo řešení pro tlusté plechy. Hodnoty tohoto řešení udávaly vždy bezpečné hodnoty návaru, avšak téměř až dvojnásobné hodnoty než bylo potřeba. Je nutno konstatovat, že analytické modely pro tenké a tlusté plechy vždy zahrnovali tepelně – fyzikální vlastnosti jen konstrukční oceli S355, protože tyto vztahy nejsou určené pro heterogenní spoje materiálů. Ačkoliv analytický model pro tenké plechy nezahrnuje součinitel tepelné vodivosti, ve kterém je právě diametrální rozdíl daných materiálu, který se pohybuje přibližně $35 \text{ W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}$. Ale zahrnuje pouze tepelnou kapacitu, která je přibližně stejná.

Závěr

Na základně vypočítaných hodnot maximálních teplot teplotních cyklů v návarech a jejich odchylek, které byly stanoveny experimentálně, analyticky a numericky. Lze soudit, že pro řešení úlohy dovolené vzdálenosti od jednoho z materiálu v heterogenních spojích je nejvhodnější numerická metoda metody konečných prvků, která vykazuje nejmenší odchylky od experimentu. Ale takové řešení může být někdy moc zdlouhavé a nepraktické. A vzhledem k ceně softwaru pro takové simulace, může být i finančně náročné. Zdali je potřeba rychle a operativně rozhodnou dovolenou vzdálenost svařování od určitého materiálu v heterogenním spoji, aby při opravě nedošlo k poškození jednoho z materiálů, nebo k změně struktury, která by se musela řešit tepelným zpracováním. Tak je nejvhodnější analytický model pro řešení šíření tepla pro heterogenní spoje, který představuje rovnice (7) v teoretické části. Sice tento vztah je odvozen pro tupé svarové spoje s předpokladem, že zdroj tepla působí na rozhraní těchto materiálů. Tak i přes tyto nedodržené podmínky, dosahoval poměrně přesných hodnot při srovnání s experimentem, kde se zdroj tepla nenacházel na rozhraní dvou materiálů, ale na určité vrstvě jednoho materiálů. Dále bych chtěl konstatovat, že pro řešení numerických simulací svařovacích procesů, je důležité mít přesné fyzikální vlastnosti materiálu, které ale ne vždy jsou dostupné.

Součástí diplomové práce je návrh opravy tupého heterogenního svarového spoje. Kde jsem využil poznatky mého zkoumání. Úlohou této opravy bylo zjistit, zda je daný spoj možné opravit a navrhnout svařovací parametry.

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval Ing. Ochodkovi za cenné rady a připomínky, které mi poskytoval při tvorbě diplomové práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Zdeňkovi Štorkánovi za pomoc s metalografií.

Seznam použité literatury

- [1] HRIVŇÁK, I. *Zváranie a zvariteľnosť materiálov*. Vydavateľstvo. STU, Bratislava, 2009.
- [2] HANDBOOK, A. S. M. *Welding, brazing and soldering*. ASM international, 1993,
- [3] KOUKAL, J.; SCHWARZ, D.; HAJDÍK, J. *Materiály a jejich svařitelnost*. Český svářečský ústav, 2009.
- [4] KUNCIPÁL, J. A KOL. *Teorie svařování*, Praha: SNTL, 1986
- [5] ISHIDA, K. *Metall and Mat Trans A*. Springer US, 2017. 1543-1940.
- [6] ČABELKA, J. *Zvariteľnosť kovov a zliatin: Vybrané state*. Veda, 1977.
- [7] PILOUS, V. *Konstruktér a tavné svařování oceli: Určeno konstruktérům, stud. a prac. v oboru tavného svařování*. SNTL, 1964.
- [8] PILOUS, V., STRÁNSKÝ K., SEJPKA, L. *Svařování austenitických ocelí spolu s feritickými*.
- [9] SMITH, L. M. *Engineering with clad steel*. místo neznámé : Nickel Development Institute, 1994.
- [10] *Designer's Handbook. Welding of stainless steels and other joining methods*. Series, A. Washington : American Iron and Steel Institute, 1988.
- [11] PILOUS, V. *Materiály a jejich chování při svařování*. Plzeň: ŠKODAWELDING, 2009.
- [12] JFE Steel Corporation | Plates | Clad Steel Plate. JFEスチール株式会社 [online]. Copyright © 2003 [cit. 11. 03. 2020]. Dostupné z: <https://www.jfe-steel.co.jp/en/products/plate/b10.html>
- [13] POORHAYDARI, K.; PATCHETT, B. M.; IVEY, D. G. *Estimation of cooling rate in the welding of plates with intermediate thickness*. Welding Journal, 2005, 84.10: 149s-155s.
- [14] SAMARDŽIĆ, Ivan; ČIKIĆ, Ante; DUNĐER, Marko. *Analytical heat conduction models at arc fusion welding*. Tehnički vjesnik, 2015, 22.6: 1641-1647.
- [15] KARKHIN, Victor A. *Thermal processes in welding*. Springer, 2019.
- [16] GORNI, Antonio Augusto. *Steel forming and heat treating handbook*. São Vicente, Brazil, 2011, 24.
- [17] TRZASKA, J. *Calculation of critical temperatures by empirical formulae*. Archives of metallurgy and materials, 2016, 61.2: 981-986.

- [18] KASATKIN, O. G.; VINOKUR, B. B.; PILYUSHENKO, V. L. *Calculation models for determining the critical points of steel*. Metal science and heat treatment, 1984, 26: 27-31.
- [19] GUTHMANN, K. *Günstige Gießtemperatur im Vergleich zum Erstarrungspunkt von Eisen und Stahlschmelzen*. Stahl und Eisen, 1951, 71.8: 399-402.
- [20] KAVULIEOVA, J., et al. *Calculation of liquidus temperature for steel by Le Chatelier-Shreder and van Laar-Bowen equations*. METALLIC MATERIALS, 2006, 44.3: 175.

Seznam obrázků

Obrázek 1.1 – Schaefflerův digram	13
Obrázek 1.2 – Rozbor svarového spoje ocelí rozdílných bází za teplot 550 °C	14
Obrázek 1.3 – Křivky průběhu teplotní roztažnosti v závislosti na teplotě ocelí rozdílných strukturních bází	14
Obrázek 1.4 – Postup svařování feritické oceli s austenitickou korozivzdornou ocelí s použitím polštářování	15
Obrázek 1.5 – Konstrukce svarového spoje oceli rozdílných bází pracujícího za teplot vyšších než 350 °C	17
Obrázek 1.6 – Svařování ocelí rozdílných strukturních bází s použitím polštářování	17
Obrázek 1.7 Návrhy svarových úkosů při svařování plátovaných ocelí A – D	19
Obrázek 1.8 – Návrhy úkosů při svařování plátovaných ocelí E – H	20
Obrázek 1.9 – Postup svařování uhlíkových nebo nízkolegovaných oceli s plátovanými nerezovými vrstvami	21
Obrázek 1.10 – Alternativní postup svařování uhlíkových nebo nízkolegovaných oceli s plátovanými nerezovými plechy	22
Obrázek 3.1 – Model polonekonečného tělesa pro vedení tepla při svařování	23
Obrázek 3.2 – Model tlustého plechu pro vedení tepla při svařování	24
Obrázek 3.3 – Model tenkého plechu pro vedení tepla při svařování	24
Obrázek 3.4 – Model tenkého prutu pro vedení tepla při svařování.....	24
Obrázek 4.1 – Vzorek pro simulaci opravy heterogenního spoje.....	31
Obrázek 4.2 – Rozmístění otvorů pro zavedení termočlánků.....	31
Obrázek 4.3 Rozmístění termočlánků na zkušební desce.....	32
Obrázek 4.4 – Vzorek po provedení simulace opravného svařování	33
Obrázek 4.5 – Vzorek návaru č. 2 pro zjištění přesných vzdáleností termočlánků od povrchu nosného návaru.....	34
Obrázek 4.6 – Grafické znázornění teplotního cyklu v návaru č. 1.....	34
Obrázek 4.7 – Grafické znázornění teplotního cyklu v návaru č. 2.....	35
Obrázek 4.8 – Návar č. 1, umístění termočlánku A	35
Obrázek 4.9 – Návar č. 1, umístění termočlánku B	36
Obrázek 4.10 – Návar č. 2, umístění termočlánku A.....	36
Obrázek 4.11 – Návar č. 2, umístění termočlánku B	36
Obrázek 4.12 – Návar č. 3, umístění termočlánku A.....	37
Obrázek 4.13 – Návar č. 3, umístění termočlánku B	37
Obrázek 4.14 – Model godlakova zdroje tepla ze softwaru Simufact Welding	41
Obrázek 4.15 – Model zdroje tepla ve tvaru komolého kužele ze softwaru Simufact Welding	41
Obrázek 4.16 – Model navařené austenitické vrstvy na podkladovou nízkolegovanou ocel ze softwaru Simufact Welding	42
Obrázek 4.17 – Detail provedení sítování v oblasti návaru.....	43

Obrázek 4.18 – Znázornění upnutí svařence při simulaci v Simufact Welding	44
Obrázek 4.19 – Teplotní pole v návaru č. 1	45
Obrázek 4.20 – Teplotní pole v návaru č. 2	46
Obrázek 4.21 – Teplotní pole v návaru č. 3	46
Obrázek 4.22 – Grafické porovnání teplotních cyklů pořízené z experimentu návaru č. 1 a numerické simulace (termočlánek A)	47
Obrázek 4.23 – Grafické porovnání teplotních cyklů pořízené z experimentu návaru č. 1 a numerické simulace (termočlánek B)	47
Obrázek 4.24 – Grafické porovnání teplotních cyklů pořízené z experimentu návaru č. 2 a numerické simulace (termočlánek A)	48
Obrázek 4.25 – Grafické porovnání teplotních cyklů pořízené z experimentu návaru č. 2 a numerické simulace (termočlánek B)	48
Obrázek 4.26 – Grafické znázornění odchylek jednotlivých způsobů výpočtů	49
Obrázek 5.1 – Makroskopický snímek heterogenního spoje oceli 316L vlevo a S355 vpravo	50
Obrázek 5.2 – Detail vzniklých vad při svařování na heterogenním spoji	51

Seznam tabulek

Tabulka 1.1 – Orientační tabulka vyráběných plátovaných materiálů a tloušťky plátovaných vrstev	19
Tabulka 4.1 – Svařovací parametry použité pro jednotlivé návary	33
Tabulka 4.2 – Přibližné vzdálenosti termočláneků od povrchu návaru a maximální teploty při opravném svařování	34
Tabulka 4.3 – Skutečné vzdálenosti termočláneku odečtené z metalografických snímků	35
Tabulka 4.4 Porovnání naměřených hodnot návárů	37
Tabulka 4.5 Výsledky analytických výpočtů	38
Tabulka 4.6– Hodnoty odchylek vypočítaných vzdáleností pro T_{max} , od skutečné vzdálenosti termočláneku	39
Tabulka 4.7 Tabulka minimálních potřebných tlouštěk vrstev návárů	39
Tabulka 4.8 – Parametry tepelného zdroje	43
Tabulka 4.9 – Porovnání maximálních hodnot teplotních cyklů mezi numerickou simulací a experimentem	49
Tabulka 4.10 – Porovnání minimální tloušťky vrstvy návaru, tak aby při svařování nedošlo k strukturnímu ovlivnění podkladového materiálu	49
Tabulka 4.11 Tabulka odchylek vypočítaných vrstev návárů	50

Seznam příloh

Příloha 1: Tabulka ocelí s mechanickými a tepelně – fyzikálními vlastnostmi

Základní materiály	Označení		Chemické složení [%]															
	dle ČSN	dle EN	Fe	Cr	Mo	Mn	Si	Ni	C	Cu	Al	P	N	S				
	-	12CrMo9-10	94,5 - 96,7	2,0 - 2,5	0,9 - 1,1	0,3 - 0,8	0 - 0,3	0 - 0,3	0,1 - 0,15	0 - 0,25	0,01 - 0,04	0 - 0,015	0 - 0,012	0 - 0,01				
			Mechanické a tepelně-fyzikální vlastnosti															
			Rm	Re	Kv	λ	c	α	Hustota									
			Mpa	Mpa	J	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	$\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{K}$	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$									
			620	400	80	39	470	13	7700									
	15 121	13CrMo4-5	Chemické složení [%]															
			Fe	Cr	Mo	Mn	Si	Cu	C	P	N	S						
			96,4 - 98,4	0,7 - 1,2	0,4 - 0,6	0,4 - 1,0	0 - 0,35	0 - 0,3	0,08 - 0,18	0 - 0,025	0 - 0,12	0 - 0,010						
			Mechanické a tepelně-fyzikální vlastnosti															
			Rm	Re	Kv	λ	c	α	Hustota									
			Mpa	Mpa	J	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	$\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{K}$	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$									
	11 523	S355	Chemické složení [%]															
			Fe	Mn	Si	C	V	S	Nb	P	Ti	N						
			97,4 - 99,5	0,5 - 1,6	0 - 0,4	0 - 0,23	0 - 0,15	0 - 0,05	0 - 0,05	0 - 0,04	0 - 0,04	0 - 0,015						
			Mechanické a tepelně-fyzikální vlastnosti															
			Rm	Re	Kv	λ	c	α	Hustota									
	11 416	P265GH	Fe	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	C	Mo	Al	Ti	P	Nb	V	N	S	
			96,9 - 99,18	0,8 - 1,4	0 - 0,4	0 - 0,3	0 - 0,3	0 - 0,3	0 - 0,2	0 - 0,08	0,02 - 0,024	0 - 0,03	0 - 0,025	0 - 0,020	0 - 0,012	0 - 0,012	0 - 0,010	
			Mechanické a tepelně-fyzikální vlastnosti															
			Rm	Re	Kv	λ	c	α	Hustota									
			Mpa	Mpa	J	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	$\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{K}$	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$									
	17 381 VN	X2CrNiMoN22-5-3	Chemické složení [%]															
			Fe	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	N	P	C	S						
			63,7 - 71,9	21,0 - 23,0	4,5 - 6,5	2,5 - 3,5	0 - 2,0	0 - 1,0	0,1 - 0,22	0 - 0,035	0 - 0,03	0 - 0,015						
			Mechanické a tepelně-fyzikální vlastnosti															
			Rm	Re	Kv	λ	c	α	Hustota									
	17 346	X5CrNiMo17-12-2	Chemické složení [%]															
			Fe	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	N	C	P	S						
			62,0 - 72,0	16,0 - 18,0	10,0 - 14,0	2,0 - 3,0	0 - 2,0	0 - 0,75	0 - 0,1	0 - 0,08	0 - 0,045	0 - 0,03						
			Mechanické a tepelně-fyzikální vlastnosti															
			Rm	Re	Kv	λ	c	α	Hustota									
	-	X3CrNiMoN27-5-2	Chemické složení [%]															
			Fe	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	N	P	C	S						
			62,2 - 69,1	24,0 - 26,0	5,5 - 6,5	1,2 - 2,0	0 - 2,0	0 - 1,0	0,14 - 0,2	0 - 0,045	0 - 0,03	0 - 0,03						
			Mechanické a tepelně-fyzikální vlastnosti															
			Rm	Re	Kv	λ	c	α	Hustota									
	17 XXX NN	X6CrNiNb-18-10	Chemické složení [%]															
			Fe	Cr	Ni	Mn	Nb	Si	C	P	S							
			64,1 - 74,0	17,0 - 19,0	9,0 - 13,0	0 - 2,0	0 - 1,0	0 - 0,75	0,04 - 0,1	0 - 0,045	0 - 0,03							
			Mechanické a tepelně-fyzikální vlastnosti															
			Rm	Re	Kv	λ	c	α	Hustota									
	42 3431	(S-)NiCu30Fe	Chemické složení [%]															
			Ni	Cu	Fe	Mn	Si	C	S									
			63,0 - 72,0	28,0 - 34,0	0 - 2,5	0 - 2,0	0 - 0,5	0 - 0,3	0,04 - 0,024									
			Mechanické a tepelně-fyzikální vlastnosti															
			Rm	Re	Kv	λ	c	α	Hustota									
		NiCr20Mn3Nb	Chemické složení [%]															
			Ni	Cr	Mn	Fe	Nb	Si	Ti	Cu	Ta	Co	C	P	S	Ostatní		
			52,0 - 81,0	13,0 - 17,0	5,0 - 9,5	0 - 10	1,0 - 2,5	0 - 1,0	0 - 1,0	0 - 0,5	0 - 0,3	0 - 0,12	0 - 0,1	0 - 0,03	0 - 0,015	0 - 0,5		
			Mechanické a tepelně-fyzikální vlastnosti															
			Rm	Re	Kv	λ	c	α	Hustota									
			Mpa	Mpa	J	$\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$	$\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$	$\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{K}$	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$									
			630	-	-	12	460	13	8400									